

# **IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT, COMO HERRAMIENTA PARA EL MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA UNIDAD HIDROLÓGICA RIO HACHA – FLORENCIA CAQUETÁ.**

**Ximena Julieth Pajarito Grajales**

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD  
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2017



# **IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT, COMO HERRAMIENTA PARA EL MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA UNIDAD HIDROLÓGICA RIO HACHA – FLORENCIA CAQUETÁ.**

**Ximena Julieth Pajarito Grajales**

Proyecto de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniería Ambiental**

Director:  
Diana Marcela Fúquene Yate

Línea de investigación:  
Gestión y manejo ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD  
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2017





*A ti mamá, por estar siempre a mi lado  
apoyándome en los proyectos y locuras que se  
van llegando a mi camino por la vida.*



## Agradecimientos

Agradezco a todos los docentes que estuvieron presentes en mi proceso de aprendizaje, de quienes aprendí bastante, quienes fueron mi guía y de quienes siento gran admiración por su dedicación y esfuerzo al enseñar lo mejor que tienen de ellos.

A Diana Fuquene, mi directora de proyecto quien me guio de la mejor manera, corriendo contra el tiempo pero con los mejores resultados.

A los integrantes de 4D Elements, especialmente a Milton Romero, quien me apoyo en el proceso de implementación y consecución de información, de quien aprendí bastante en el manejo de sistemas de información geográfica y muchos más temas ambientales, que harán parte de mi carrera como profesional y como persona.

A USAID quien permitió el uso de información detallada de la zona, producto de proyectos desarrollados en conjunto con 4D Elements.

Porque todos aportaron a este proyecto. Gracias.

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo principal implementar el modelo de simulación hidrológica SWAT en la unidad hidrológica del Río Hacha ubicada en el municipio de Florencia (Caquetá); este modelo obtiene como resultado final el cálculo del balance hídrico; para el desarrollo del mismo se requiere de la recopilación de información de clima, suelos, hidrológica e hidrográfica, como también la generación de información espacial mediante el uso de sistemas de información geográfica como subunidades hidrográficas, red de drenaje ajustada y coberturas del suelo. El uso de esta información permite predecir la producción de agua y sedimentos en la unidad hidrológica; como estrategia para la identificación de los impactos y posibles cambios asociados a las actividades desarrolladas en la zona.

Bajo este criterio y con el propósito de aportar información de calidad y útil, para la toma de decisiones en el manejo del recurso hídrico de este municipio; se identifican los subcuencas de mayor potencialidad hídrica al interior de la unidad hidrológica; con los resultados obtenidos por este trabajo de grado se espera que las entidades gubernamentales correspondientes a la zona desarrollen acciones pertinentes en el manejo adecuado del recurso hídrico.

La implementación del modelo de simulación hidrológica, arroja como promedio anual de precipitación un valor de 2585 mm, el cual relacionándolo con el último comunicado de Cambio Climático del IDEAM se halla que se encuentra dentro del rango reportado para la zona (2.000 – 4.000 mm); igualmente se encontró que la zona presenta un régimen de lluvias monomodal, con mayor precipitación en los meses de abril a noviembre.

**Palabras claves:** *Recurso hídrico, Unidad hidrológica, Balance Hídrico, SIG, Modelo hidrológico, Manejo del recurso.*

## Abstract

The main objective of this work is to implement the SWAT hydrological simulation model in the hydrological unit of Rio Hacha located in the municipality of Florencia (Caquetá); this model obtains as final result the calculation of the water balance; for the development of the same requires the collection of information on climate, soil, hydrological and hydrographic, as well as the generation of spatial information through the use of geographic information systems such as hydrographic subunits, drainage network and soil cover. The use of this information allows to predict the production of water and sediments in the hydrological unit; as a strategy for the identification of the impacts and possible changes associated with the activities carried out in the area.

Under this criterion and with the purpose of providing quality and useful information, for decision making in the management of the water resource of this municipality; the sub-basins of greater hydro potential are identified within the hydrological unit; with the results obtained by this degree work it is expected that the governmental entities corresponding to the area develop relevant actions in the proper management of the water resource.

The implementation of the hydrological simulation model yields an average annual rainfall of 2585 mm, which is related to IDEAM's latest Climate Change statement, which is within the range reported for the zone (2,000-4,000 mm) ; it was also found that the zone presents a monomodal rainfall regime, with greater precipitation in the months of April to November.

**Keywords:** *Water resource, Hydrological unit, Water balance, GIS, Hydrological model, Resource management.*

## Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>15</b>
<b>2. Justificación.....</b>	<b>18</b>
<b>3. Objetivos .....</b>	<b>20</b>
3.1.1 General .....	20
3.1.2 Específicos.....	20
<b>4. Marco teórico .....</b>	<b>21</b>
4.1 Modelos hidrológicos .....	21
4.1.1 Descripción del Modelo SWAT .....	25
<b>5. Caso de estudio .....</b>	<b>28</b>
5.1 Descripción del área de estudio.....	28
5.1.1 Ubicación Geográfica.....	28
5.1.2 Zonas de protección ambiental.....	30
5.1.3 Información climática .....	32
5.1.4 Hidrografía .....	35
5.1.5 Coberturas de la tierra .....	38
5.1.6 Uso del Suelo.....	40
<b>6. Metodología.....</b>	<b>43</b>
6.1 Fase I. Generación y recopilación de la información básica y temática del área de estudio .....	44
6.2 Fase II: Aprestamiento de la información .....	45
6.3 Fase III: Implementación del modelo .....	45
6.4 Fase IV: Calibración del modelo .....	46

---

6.5	Fase V: Análisis de los datos obtenidos .....	46
<b>7.</b>	<b>Implementación del modelo SWAT .....</b>	<b>47</b>
7.1	Generación y recopilación de la información .....	47
7.2	Tratamiento de la información.....	48
7.3	Resultados y discusión .....	60
7.3.1	Balance hídrico .....	60
7.3.2	Calibración .....	83
7.3.3	Subcuencas con potencialidad hídrica.....	86
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>89</b>
8.1	Conclusiones.....	89
8.2	Recomendaciones .....	91
	<b>Glosario.....</b>	<b>93</b>
<b>9.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>95</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Metodología de cálculo del balance hídrico.....	43
Figura 2. Formato variables climáticas por estación.....	48
Figura 3. Formato variables climáticas vacías por estación. ....	49
Figura 4. Interface de SPAW, datos requeridos para el calculo. ....	53
Figura 5. Interface de SPAW, resultados aportados por el programa. ....	54
Figura 6. Comportamiento precipitación mensual, por subunidad de análisis.....	62
Figura 7. Comportamiento precipitación por subunidad de análisis - anual. ....	63
Figura 8. Caudal mensual observado y simulado, para el periodo de 2005 - 2009.....	86



## Lista de tablas

Tabla 1. Estaciones IDEAM al interior de la unidad hidrográfica Hacha.....	33
Tabla 2. Área en Ha Subcuencas de análisis. ....	35
Tabla 3. Área de coberturas de la tierra unidad río hidrológica Hacha. ....	38
Tabla 4. Unidades cartográficas al interior del río Hacha. ....	40
Tabla 5. Detalle de información requerida para el desarrollo del proyecto. ....	44
Tabla 6. Descripción de grupos hidrológicos. ....	50
Tabla 7. Clasificación grupos hidrológicos. ....	51
Tabla 8. Factor B, codificación estructural del suelo.....	57
Tabla 9. Factor C, codificación permeabilidad del suelo.....	58
Tabla 10. Clasificación coberturas SWAT.....	58
Tabla 11. Datos hidrológicos, obtenidos de la simulación con SWAT. ....	61
Tabla 12. Relación variables balance hídrico. ....	62
Tabla 13. Datos de caudal mensuales observados y simulados, para la unidad hidrológica río Hacha. ....	84
<b>Tabla 14.</b> Clasificación de resultados coeficiente de eficiencia Nash y Sutcliffe.....	85

## Lista de mapas

Mapa 1. Ubicación geográfica unidad Hidrológica río Hacha. ....	29
Mapa 2. Zonas de protección ambiental al interior del río Hacha.....	31
Mapa 3. Estaciones climáticas e hidrológicas al interior de la cuenca río Hacha.....	34
Mapa 4. Subcuencas de análisis y red hídrica, unidad hidrológica río Hacha.....	37
Mapa 5. Coberturas de la tierra unidad Hidrológica río Hacha. ....	39
Mapa 6. Unidades cartográficas al interior del río Hacha. ....	42
Mapa 7. Mapa de grupos hidrológicos al interior de la unidad hidrológica río Hacha. ....	52
Mapa 8. Precipitación promedio anual multianual. ....	64
Mapa 9. Escorrentía superficial, promedio anual multianual. ....	66
Mapa 10. Percolación promedio anual multianual. ....	68
Mapa 11. Evapotranspiración real promedio anual multianual. ....	70
Mapa 12. Flujo lateral promedio anual multianual. ....	72
Mapa 13. Flujo de retorno a la cuenca promedio anual multianual. ....	74
Mapa 14. Caudal Total promedio anual multianual. ....	76
Mapa 15. Recarga de acuíferos promedio anual multianual. ....	78
Mapa 16. Demanda hídrica por cobertura promedio anual multianual. ....	80
Mapa 17. Oferta hídrica global promedio anual multianual. ....	82

# 1. Introducción

Identificar las condiciones hidrológicas de una cuenca hidrográfica, facilita la toma de decisiones y planificación del territorio, en función de los recursos naturales disponibles y el uso adecuado de los mismos. PNGIRH, 2012), de la cual se pueden analizar los parámetros hidrológicos y a su vez la función que cumple en el entorno; se realizan las diferentes clasificaciones de las unidades hidrográficas (Cuenca, subcuenca, unidad hidrológica y subunidad hidrológica), con el propósito de delimitar áreas con características similares, en las cuales se evalúan los diferentes procesos naturales y antrópicos, siendo esto una característica que permite analizar de forma eficaz los resultados obtenidos.

Una herramienta que aportar en la identificación de estos parámetros hidrológicos es un modelo de simulación hidrológica, el cual interpreta la información temporal y espacial disponible para el área de estudio, mediante la asociación de los componentes del ciclo hidrológico.

Para el presente trabajo de investigación se decide implementar la herramienta denominada Soil and Water Assessment Tool, por sus siglas en ingles SWAT, la cual es un modelo de simulación hidrológica desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en conjunto con la Universidad de Texas; el cual opera mediante una interface de ArcGis denominada ArcSWAT, la cual es usada mediante los sistemas de información geográfica, trabajando con datos diarios u horario de acuerdo a la información disponible, simulando la producción de agua y sedimentos de acuerdo a los usos del suelo y la cobertura natural de una unidad hidrográfica, así mismo permite predecir los impactos generados en el área de estudio, debido al desarrollo de las diferentes actividades antrópicas.

Para implementar este modelo es necesario contar con información climática histórica, usos del suelo, coberturas de la tierra, modelo digital del terreno, unidades de análisis hidrológicas y red hidrológica; información que le permite dividir la zona de estudio en sub áreas de análisis las cuales contienen características físicas y climatológicas homogéneas, siendo esto una ventaja para la interpretación de los resultados obtenidos mediante la simulación.

El área de estudio seleccionada corresponde a la unidad hidrológica del río Hacha tributario del río Orteguaza, ubicada en el municipio de Florencia (Caquetá), la cual es reconocida por ser la más importante del departamento, debido a que esta suministra la totalidad del agua para consumo humano para la cabecera municipal y para el uso agropecuario del municipio. Dado a la presión antrópica a la cual ha sido sometido en las últimas décadas, el piedemonte caqueteño y en especial las unidades hidrográficas altas del río Orteguaza, entre ellas el río Hacha, se ha evidenciado un efecto negativo en la oferta y calidad del agua. Como también un efecto en sus coberturas naturales debido al incremento de la ganadería extensiva, generando así disminución de la biodiversidad entre otras consecuencias; todo esto sumado a la implementación de proyectos de infraestructura, el crecimiento poblacional y los planes de desarrollo que han venido afectando esta región hidrológica, conllevan a presentar un estado deteriorado en la actualidad; por lo cual se decide aplicar este trabajo investigativo en esta zona. Partiendo de que hoy en día el departamento del Caquetá es considerado como el Hotspot de la deforestación en Colombia.

Dado lo anterior, se espera que los resultados de este trabajo permitan reconocer las características hidrológicas del área de estudio, como también identificar zonas de riqueza hídrica, bajo las cuales se podrá generar una priorización y propuesta de acciones de manejo ambiental, aportando elementos para la toma de decisiones responsables en el manejo de este recurso natural y vital para el desarrollo social, cultural y económico. Así mismo, se plantea una propuesta de manejo encaminada a la disminución de las afectaciones a los ecosistemas, debido al desarrollo económico actual, aportando al mejoramiento de la calidad de vida de las personas que habitan en la zona.

Para la implementación de este modelo de simulación hidrológica para el caso de estudio del río Hacha, se contó con la información de 3 estaciones climáticas con datos diarios de precipitación y temperatura, por un periodo de 11 años (2005 – 2015), datos del Instituto de hidrología, Meteorológica y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM, coberturas de la tierra a una escala de 1:25.000 año 2016, generadas por la empresa de consultoría 4D Elements, usos del suelo y características fisicoquímicas de los perfiles modales del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia – IGAC, Modelo digital del terreno de 12 m (ASF), red hídrica detallada y subunidades hidrográficas (4D Elements – Proyecto USAID).

## **2. Justificación**

La unidad hidrológica río Hacha a la fecha se encuentra catalogada como zona de alta importancia por el suministro de agua para consumo humano para la totalidad del municipio de Florencia (Caquetá), y como cuenca abastecedora para el desarrollo de actividades agropecuarias de la zona, a su vez esta es considerada zona de alta vulnerabilidad de acuerdo al incremento de la deforestación, y aumento de la población que conlleva el uso potencial del suelo.

Esta se encuentra ubicada en el municipio de Florencia (Caquetá) y es reconocida por ser la más importante del departamento. Dado a la presión antrópica a la cual ha sido sometido en las últimas décadas, el piedemonte caqueteño y en especial las unidades hidrográficas altas del río Orteguaza, entre ellas el río Hacha, se ha evidenciado un efecto negativo en la oferta y calidad del agua; como también un efecto en sus coberturas naturales debido al incremento de la ganadería extensiva, generando así disminución de la biodiversidad entre otras consecuencias.

El conocimiento de las características hidrológicas de una determinada zona, aporta elementos de juicio para la toma de decisiones en la planificación del territorio, manejo y uso sostenible de los recursos naturales, con el fin de proporcionar estos conocimientos sobre las condiciones hidrológicas de un área, se selecciona la unidad hidrológica Río Hacha como área para implementar el modelo de simulación hidrológica SWAT, este tiene como objetivo principal predecir la producción de agua y sedimentos de una unidad hidrológica, mediante la representación de los factores asociados al ciclo hidrológico, así mismo su implementación permite simular cambios de usos del suelo, los cuales influyen directamente en la disponibilidad y calidad del agua en la unidad hidrológica.

Como se puede saber existen diversos tipos de simulación hidrológica, basados en datos reales, datos simulados, o datos comparativos; estos modelos tienen un enfoque particular, pero todos a su vez buscan modelar como su nombre lo indica las condiciones hidrológicas de una determinada zona, enfocados en reconocer los cambios en los ecosistemas naturales y la disponibilidad de los recursos existentes, los que conllevan al deterioro progresivo de la calidad de vida de las personas que allí habitan.

La aplicación de este modelo de simulación que trabaja con datos detallados, (diarios u horarios dependiendo de la disponibilidad de datos), permite con datos reales de la zona, identificar las condiciones del área con respecto a un determinado tiempo simulando, representando los diferentes factores o componentes del ciclo hidrológico, estableciendo sus conceptos metodológicos sobre el balance hídrico, aunque este no es uno de los modelos más sencillos, por requerir un amplio volumen de información detallada de la zona; es un modelo de tipo no lineal, global o sistémico, que simula aspectos naturales del ciclo hidrológico, permite generar un detalle de todas las variables climáticas asociadas, esto enfocado a que el modelo genera las llamadas HRU (unidades de respuesta hidrológica), las cuales cuentan con características físicas y climatológicas uniformes, esto quiere decir que al interior del área de estudio este modelo subdivide las unidades de análisis en pequeñas áreas similares, lo que facilita en gran medida el análisis de los resultados obtenidos y a su vez da mayor detalle, aumentando la posibilidad de tomar decisiones locales. La estrategia de implementación del mismo permite generar un manejo adecuado del recurso hídrico, basando en la identificación de las zonas de potencialidad hídrica. El desarrollo de este modelo requiere el uso de una extensión del software ArcMap llamado ArcSwat, la cual se encuentra disponible de forma gratuita en (<http://swat.tamu.edu/>), otra gran ventaja ya que no se requiere de altos recursos para su implementación, igualmente es de saber que ArcMap, se encuentra disponible para usuarios de prueba en el siguiente link (<http://www.esri.com/>), con una licencia de 60 días, tiempo suficiente para implementar el modelo.

## **3.Objetivos**

### **3.1.1 General**

Implementar el modelo de simulación hidrológica SWAT para el cálculo del balance hídrico en la unidad hidrológica Rio Hacha, como estrategia de manejo del recurso hídrico mediante la identificación de los puntos con mayor potencialidad hídrica.

### **3.1.2 Específicos**

- Elaborar el balance hídrico en la unidad hidrológica Rio Hacha, aplicando el modelo de simulación hidrológica SWAT, partiendo de la información disponible para la zona.
- Calibrar el modelo hidrológico SWAT con los datos de caudal de la estación limnográfica No 44037050, ubicada en la salida de la unidad hidrológica.
- Determinar los puntos de mayor potencialidad hídrica al interior de la unidad hidrológica a partir de los resultados de simulación, como estrategia para el manejo del recurso hídrico de la zona.



## **4.Marco teórico**

### **4.1 Modelos hidrológicos**

Los modelos hidrológicos son herramientas que buscan representar la realidad de un área, en este caso las variables del ciclo hidrológico de una determinada cuenca, los diferentes modelos de simulación son aplicables a cuencas hidrográficas de cualquier tamaño, de preferencia que no presenten grandes cambios en sus características físicas, hídricas y/o climáticas; sin embargo, esto es una situación complicada debido a las características ecosistémicas, climáticas y geomorfológicas existentes en el país. Cabe resaltar que cada modelo hidrológico, cuenta con patrones específicos que limitan su aplicación a todas las áreas por lo cual se debe inicialmente analizar el área de estudio y la información que se tiene de esta para así elegir el modelo a implementar. Por otro lado, es importante tener en cuenta que la incertidumbre de los resultados obtenidos, depende directamente de la cantidad y calidad de la información obtenida de la zona de estudio, relacionando aquí: estaciones climáticas y series históricas, escala de la información cartográfica, fuente de información, entre otros aspectos.

Así mismo es importante resaltar que el no contar con la totalidad de información específica del área de estudio, no limita la aplicación del modelo, ya que diferentes instituciones cuentan con información libre en la red a menor escala a nivel mundial, la cual puede ser usada en la implementación de los modelos hidrológicos; no obstante, esto genera una incertidumbre mayor en los datos obtenidos, limitando la toma de decisiones a nivel local y a nivel regional del área de análisis.

Los modelos hidrológicos son herramientas para la gestión y planificación del territorio, estos posibilitan conocer las condiciones de una zona, mediante el uso de información local, siendo esta información base la que posibilita el desarrollo de otros análisis o estudios detallados en cuanto a temas relacionados con calidad del agua, erosión, inundaciones, distribución del recurso entre otros.

Debido a que existen diversos tipos de modelos de simulación hidrológica, cada modelo responde a un propósito específico, y este es el que se debe evaluar en primera instancia antes de seleccionar el modelo a usar. Adicionalmente, es importante evaluar la disponibilidad de información y el detalle de la misma, para así también decidir qué modelo implementar en cada caso de estudio.

Los modelos de simulación se pueden dividir en tres grandes grupos de acuerdo a sus características siendo 1) los conceptuales y de procesos básicos, 2) de naturaleza algorítmica básica y 3) de representación espacial (Según Cabrera). Al interior de cada una de estas categorías se encuentran una serie de modelos que cumplen con las características, sin embargo cabe resaltar que el presente documento nombraran algunos de los modelos existentes, dejando claro que existen más y con diferentes categorizaciones de acuerdo al tipo y resultados de cada modelo.

- 1) **Conceptuales y de procesos básicos:** al interior de este se encuentran tres tipos de modelos, inicialmente los modelos empíricos o caja negra, los cuales funcionan con entradas y salidas, y no describen los procesos intermedios, de esta categoría se encuentran modelos como Kostiakov y Green Ampt (estimación de infiltración), método racional y método del número de curva (generación de caudales).

Seguido se encuentran los modelos de base física o teóricos, también llamados de caja blanca, en estos al contrario de los de caja negra, se conocen todos los procesos intermedios entre las entradas y las salidas, estos modelos se basan en el uso de ecuaciones diferenciales, siguiendo las leyes de la física y la teoría de los procesos químicos, dentro de estos modelos se encuentran; TOPMODEL, TOPKAPI, SHE.

Y por último, en esta categoría se encuentran los modelos conceptuales o caja gris, estos representan de forma simplificada los procesos físicos, no se pueden observar todos los procesos intermedios entre entradas y salidas, y en ellos se encuentran modelos como abc, HBV.

- 2) **De naturaleza algorítmica básica:** dentro de estos modelos se encuentran dos categorías muy marcadas, estos modelos básicamente funcionan bajo una ecuación que presenta diversas incógnitas, llevando un proceso lógico de las entradas y salidas, y sus intermedios, se dice que cuando una de estas variables es aleatoria el modelo es denominado estocástico, eso quiere decir que la variabilidad depende expresamente de la variable aleatoria, a su vez las salidas son independientes del tiempo y del espacio, lo que hace que sea menos preciso. Aquí se pueden encontrar modelos como: ARIMA, Auto regresión, medias móviles. Y por el contrario si todas las variables de la ecuación son no aleatorias, el modelo es determinado como determinístico lo que quiere decir que hace una relación de la causa – efecto, suministrando un buen detalle del área de estudio, sin embargo no muestra un detalle espacial ni temporal, impidiendo la toma de decisiones ante el territorio.
- 3) **De representación espacial:** los modelos que se encuentran en esta categoría principalmente integran las variables de entrada, salida e intermedios, haciendo un análisis detallado de todo el proceso del sistema, incluyendo las propiedades del suelo, los procesos desarrollados en la capa sub superficial y en la capa subterránea de la cuenca, a pesar de eso estos modelos son eficientes en cuencas de menor tamaño debido a que se consideran homogéneas en su distribución y características del suelo, estos modelos son llamados agregados o agrupados; esto quiere decir que trabaja con datos generales de la zona de estudio, arrojando un resultado que no muestra diferencia de zonas por tipo de suelo, por lo cual disminuye el detalle de los resultados. Cuando el tamaño de la cuenca va a aumentando, las características del suelo, probablemente van cambiando, por lo tanto se hace necesario dividir la zona en pequeñas zonas con características

similares, para garantizar que las condiciones del suelo sean lo más homogéneas posible, aquí es donde aparece el concepto de HRU (Unidad de respuesta hidrológica) y estos modelos se les denomina, modelos semi distribuidos, que trabajan bajo la misma teoría de los agrupados, únicamente se le agrega la subdivisión por HRU. Estos modelos de representación espacial semi distribuidos, como su nombre lo indica, modelan la variabilidad espacial y a su vez la temporal, trabajando bajo los sistemas de información geográfica, con datos reales y detallados del área de estudio, dentro de estos se encuentran los modelos denominados WEAP, JAMS, SWAT, entre otros. Así mismo en esta categoría se encuentran los modelos distribuidos los cuales trabajan bajo la estructura de “grilla”, la cual abarca un área menor y hace que el análisis sea más detallado, sin embargo requiere de mayor información detallada y distribuida homogéneamente en el área de estudio.

Aunque podría considerarse que el modelo distribuido es el que representa en mejor medida las condiciones hidrológicas del área de estudio, el presente documento se basó en aplicar el modelo SWAT, por su ventaja de generar las HRU (Unidad de respuesta hidrológica), unidades que cuentan con condiciones similares y permiten detallar el área de estudio facilitando la toma de decisiones. No se decide usar un modelo distribuido debido a que estos requieren de mayor información, la cual debe estar distribuida homogéneamente en el área de estudio y a su vez requiere información climática de diferentes variables, con las cuales no se cuenta en el momento, igualmente, se decide descartar modelos como WEAP y JAMS, debido a la falta de información como radiación solar y por la escasa relación que generan estos con el uso del suelo, tipo del suelo y coberturas naturales, relación que si genera SWAT.

En cuanto a la calibración de los modelos se puede afirmar que este proceso asegura que los datos obtenidos en el modelo representan la realidad del terreno, esta calibración se realiza relacionando los datos finales de caudal de la modelación con los datos de caudal medidos en la estación hidrológica ubicada a la salida de la unidad hidrológica de análisis.

La clasificación descrita en este documento como se nombró anteriormente está basada según la literatura publicada por el Ingeniero Cabrera, quien a la fecha presenta una trayectoria profesional enfocada principalmente al manejo de los recursos hídricos, simulación hidrológica, cambio climático entre otros temas ambientales.

#### **4.1.1 Descripción del Modelo SWAT**

El modelo de simulación hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool, por sus siglas en inglés), fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en conjunto con la Universidad de Texas; este permite predecir y evaluar los impactos del uso del suelo en una cuenca, relacionados con uno o varios procesos del ciclo hidrológico; así mismo simula la producción de agua y sedimentos de acuerdo a las actividades desarrolladas en una unidad hidrológica acorde con la información temporal y espacial existente. Este modelo permite incluir componentes del ciclo hidrológico (Precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento), aportando información de valoración de los cambios generados en la producción de caudal y sedimentos en el área de estudio. Según la clasificación anteriormente descrita el modelo SWAT, es un modelo semi distribuido de variabilidad espacial, que arroja datos numéricos.

Este modelo se basa en la ecuación del cálculo del balance hídrico, por lo cual es considerado para el desarrollo del presente trabajo, ya que con la implementación de este se espera generar resultados de las diferentes variables que se relaciona el balance hídrico para la unidad hidrológica río Hacha, datos que aportan a la identificación de las subcuencas con potencialidad hídrica.

**Ecuación 1. Balance Hidrológico.**

$$Ds(t) = P(t) - E(t) - R(t) - Pr(t) - Fb(t)$$

En donde,

Ds = Cambio en el almacenamiento de agua en el suelo en función del tiempo.

P = Precipitación en mm por unidad de tiempo.

E = Evapotranspiración en mm por unidad de tiempo.

R = Escorrentía superficial en mm por unidad de tiempo.

Pr = Percolación en mm por unidad de tiempo

Fb = Flujo base en mm por unidad de tiempo

La implementación del modelo hidrológico SWAT contempla el uso de información espacial como: cobertura vegetal, red hidrológica, tipo de suelos y pendiente; como también información temporal como: clima (precipitación diaria, temperatura diaria máxima y mínima, caudales diarios “Obligatoria”) (sedimentos, radiación solar, velocidad del viento y evapotranspiración “Opcional”). Cabe resaltar que la disponibilidad y calidad de la información limita las zonas de estudio, dado a que existen zonas en el país en las cuales no se cuenta con información, como también zonas en las cuales la información no es de calidad y no permite ser usada en este tipo de modelos.

El modelo SWAT trabaja con datos diarios u horario de acuerdo a los datos disponibles para el área de estudio, este modelo divide la zona de estudio en sub áreas que permiten mejorar el análisis de los resultados, definiéndolas como zonas de características físicas y climatológicas homogéneas, denominadas HRU (unidades de respuesta hidrológica). Con estas áreas delimitadas por las características homogéneas se logra generar un análisis más detallado y a su vez proponer soluciones a problemáticas locales.

Por otro lado, el modelo de simulación hidrológica permite calcular diferentes indicadores, de los cuales se realiza una breve descripción a continuación, teniendo en cuenta que aunque el modelo realiza este tipo de simulaciones, para el presente trabajo no se desarrollaron debido a que no se contó la información base requerida.

Sobre crecimiento de plantas simula indicadores de: crecimiento potencial en la biomasa, transpiración actual y potencial, absorción de nutrientes (nitrógeno y fosforo) y restricción de crecimiento (crecimiento no alcanzado debido a las limitaciones impuestas por el ambiente).

Sobre erosión simula indicadores de: niveles de erosión, sedimentos y energía erosiva.

Sobre nutrientes simula indicadores de: volatilización del nitrógeno, nitrógeno orgánico fertilizante, niveles de nitrificación, niveles de des-nitrificación, mineralización y residuo del nitrógeno, fosforo orgánico fertilizante, niveles de fosforo, mineralización y residuo de fosforo.

Sobre pesticidas simula indicadores de: movimiento de pesticidas en la red hídrica, en recarga de acuíferos, en sedimentos y hacia el perfil del suelo. Adicionalmente volatilización y degradación del pesticida.

Algunos de estos indicadores se pueden relacionar con parámetros del ciclo hidrológico de la cuenca simulada, esto de acuerdo a los requerimientos y alcances del trabajo a desarrollar.

## **5.Caso de estudio**

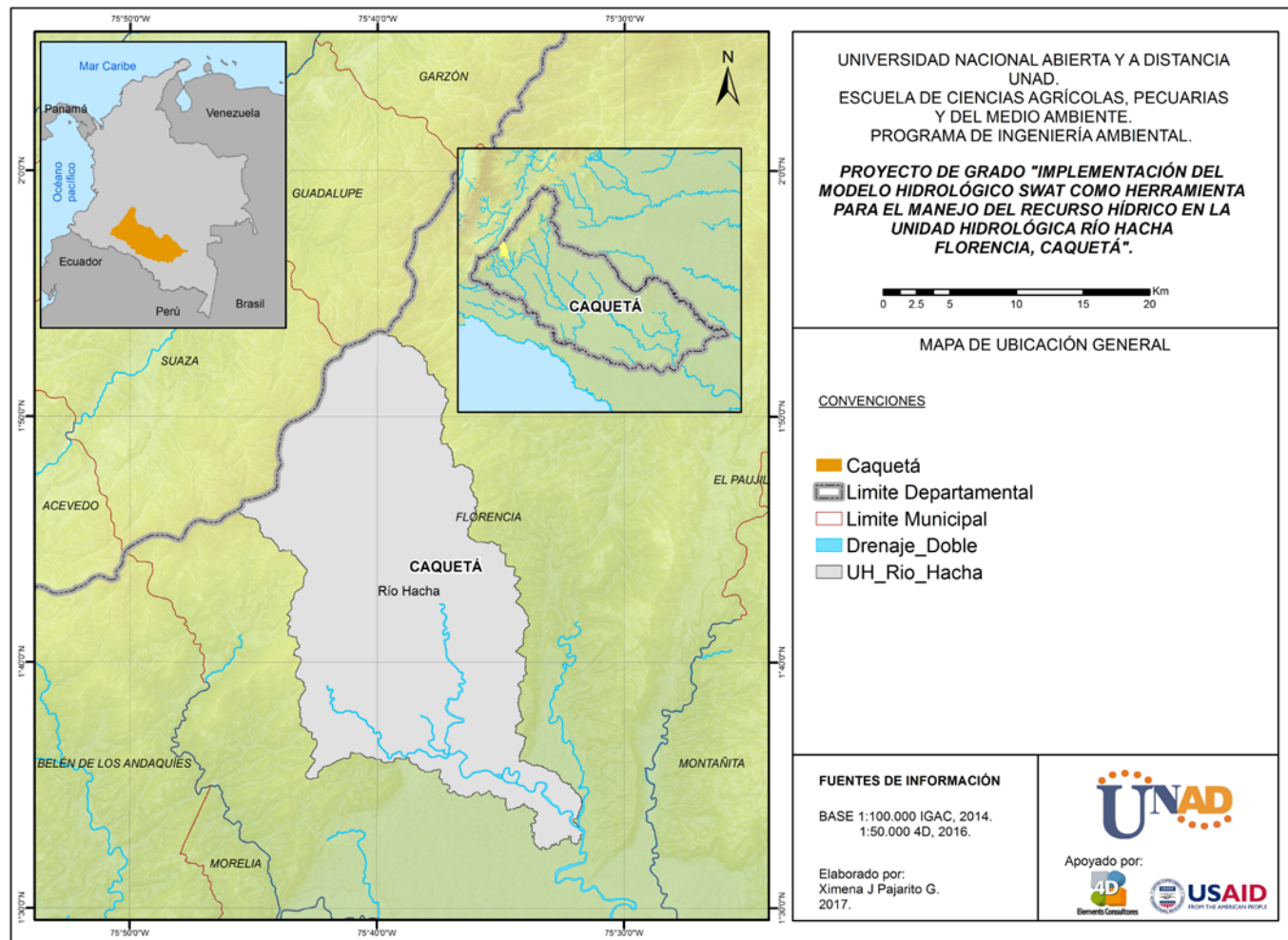
### **5.1 Descripción del área de estudio**

#### **5.1.1 Ubicación Geográfica**

La unidad hidrológica río Hacha ubicada en el municipio de Florencia en el departamento del Caquetá, presenta un rango altitudinal desde los 251 msnm hasta los 2703 msnm, con un área de 49.105 Ha. Se ubica al suroccidente del país, limitando por el norte con los municipios de Guadalupe y Suaza del departamento del Huila, por el sur con Morelia y Milán (Caquetá), por el occidente con Acevedo (Huila) y Belén de los Andaquíes (Caquetá), y por el oriente con Montañita y el Paujil (Chaqueta).

Esta unidad hidrológica pertenece a dos grandes regiones del país, la región oriental y la altiplanicie amazónica; por encontrarse distribuida en estas dos regiones se cataloga como zona de alta importancia a nivel regional y nacional, en aspectos ecosistémicos e hidrológico. **Mapa 1.**





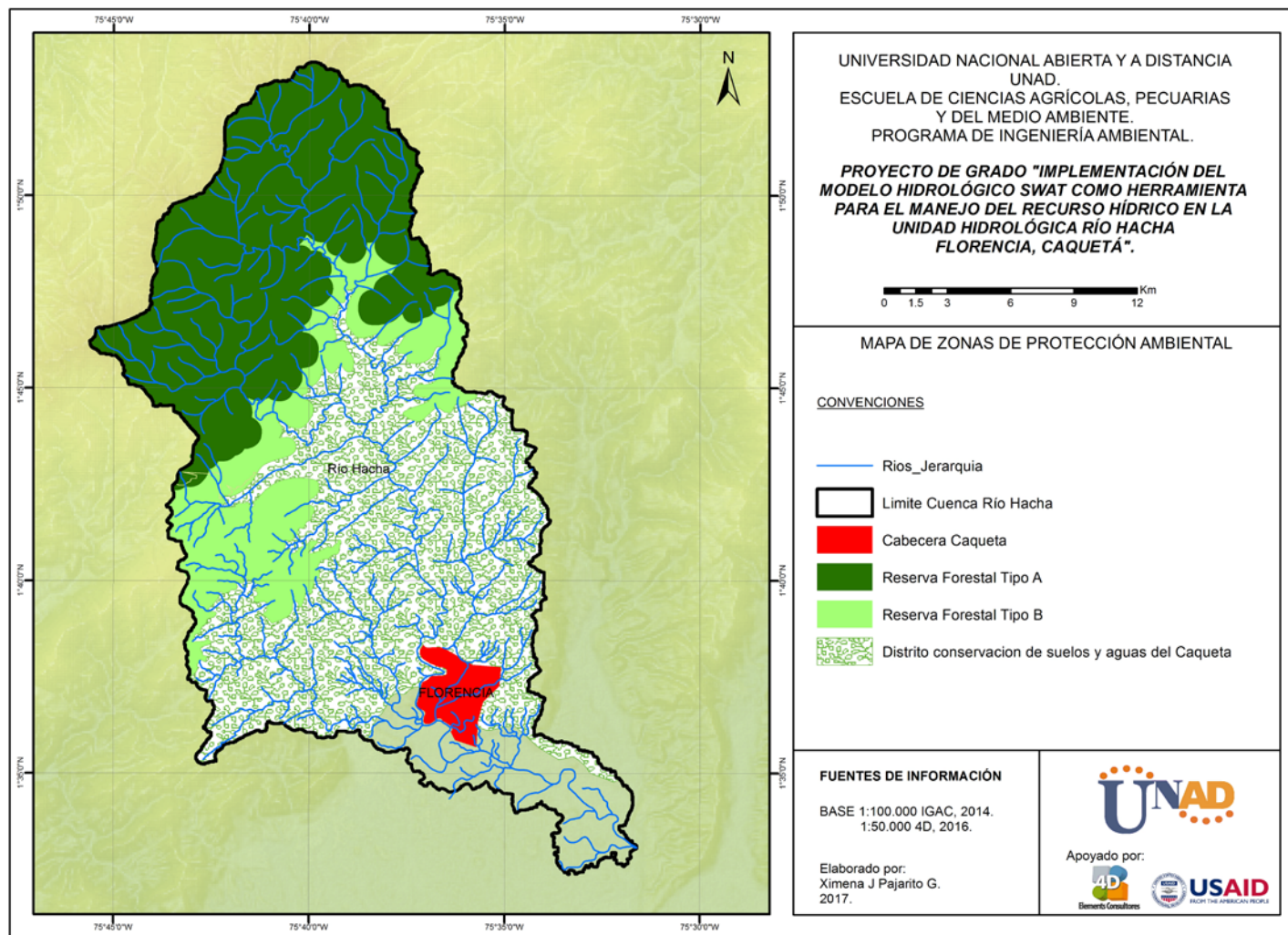
**Mapa 1.** Ubicación geográfica unidad Hidrológica río Hacha.

Fuente: Autor.

La unidad hidrológica del río Hacha, es una unidad de gran importancia a nivel regional, la cual se ha visto sometida a grandes intervenciones antrópicas desde hace varias décadas, desde los primeros asentamientos humanos, los cuales iniciaron el uso de los recursos naturales de forma no planificada, llegando a remplazar los bosques de niebla por sistemas agropecuarios, que con el pasar del tiempo han aumentado junto con la población; estas acciones han disminuido la cobertura natural de la zona; conllevando a la deforestación y pérdida de la biodiversidad. Debido a que la unidad hidrológica está catalogada como una fuente de abastecimiento de gran importancia en el municipio de Florencia, el estado de la misma es de gran importancia para todos los entes reguladores y a su vez para la comunidad; por lo anterior y partiendo de que a la fecha la zona se encuentra afectada en gran medida por las intervenciones antrópicas, que han generado eventos de inundaciones, especialmente por la pérdida de coberturas naturales y de acuerdo a los escenarios de cambio climático publicados por el IDEAM (Instituto de hidrología, meteorológica y estudios ambientales) que muestran una disminución de hasta un 20% de la precipitación y un aumento de la temperatura hasta de 3 grados en el año 2100; se cree que este tipo de simulaciones permitirán determinar cuál es realmente el estado del recurso hídrico de la zona, generando datos que aportaran en la planificación o uso sostenible del terreno, fundando estabilidad a la zona y a su vez a la comunidad que en ella habita.

### **5.1.2 Zonas de protección ambiental**

En cuanto a las zonas de protección ambiental el río Hacha cuenta con 16.115 Ha categorizada como Reserva Forestal Protectora Tipo A, y 6.680 Ha tipo B, ocupando está en total el 46 % del área de toda la unidad, así mismo hace parte de esta el Distrito de Conservación de Suelos y Aguas del Caquetá con un área de 21.512 Ha correspondientes al 44 % del área total, sumado se observa que el 90% del área del río Hacha se encuentra bajo protección ambiental. **Mapa 2.**



**Mapa 2.** Zonas de protección ambiental al interior del río Hacha.

Fuente: Autor.

### 5.1.3 Información climática

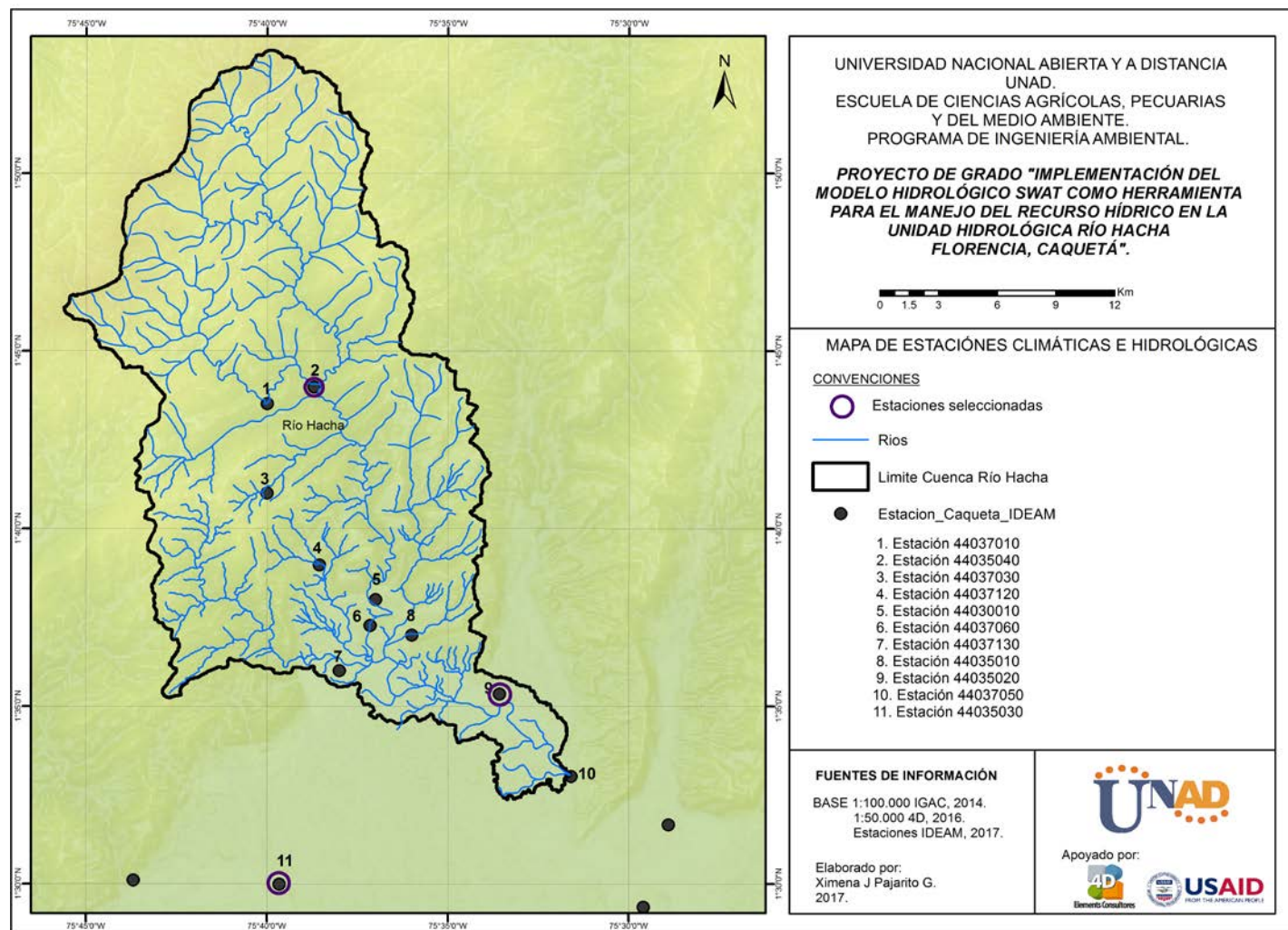
Al interior de esta unidad hidrográfica se ubican 6 estaciones climáticas y cuatro estaciones hidrológicas del Instituto de Hidrológica, Meteorológica y Estudios Ambientales IDEAM, de las cuales a la fecha se encuentran en funcionamiento cuatro climáticas y dos hidrológicas, de estas se seleccionan para la investigación dos climáticas ubicadas al interior de la unidad (Apto G Artunduaga y Florencia Deslizamiento) y una hidrológica que se encuentra aledaña a la zona de estudio (Macagual), las series históricas de estas tres estaciones se usaron para el cálculo del objetivo principal de este proyecto. El detalle de estas estaciones y la ubicación de estas se pueden observar en la **Tabla 1** y **Mapa 3**.

**Tabla 1.** Estaciones IDEAM al interior de la unidad hidrográfica Hacha.

Código	Nombre	Tipo	Clase	Cate	Estado	Latitud	Longitud	Altitud	Fecha Instalación	Fecha Suspensión
44030010	PLANTAS FLORENCIA	CON	MET	PM	SUS	1.63333	-75.616667	270	15/11/1958	15/09/1973
44035010	FLORENCIA C A	CON	MET	AM	SUS	1.61666	-75.6	280	15/10/1969	15/02/1984
44035020	APTO G ARTUNDUAGA	CON	MET	CO	ACT	1.58905	-75.559556	244	15/10/1969	Activa
44035040	FLORENCIA- DESLIZAMIENT	AUT	MET	CP	ACT	1.733	-75.645028	600	4/2/2006	Activa
44037030	DIAMANTE EL	CON	HID	LM	SUS	1.68333	-75.666667	550	15/06/1963	15/09/1988
44037040	EL ROSARIO AUTOMATICA	AUT	HMT	HA	ACT	1.72525	-75.666389	600	15/08/1964	Activa
44037050	VENECIA	CON	HID	LG	ACT	1.56311	-75.529306	520	15/02/1971	Activa
44037060	FLORENCIA- HACHA	AUT	HMT	HA	ACT	1.62117	-75.619222	270	15/02/1971	Activa
44037120	BOCATOMA 1	CON	HID	LM	ACT	1.64963	-75.642583	480	15/08/1970	Activa
44037130	BOCATOMA 2	CON	HID	LG	SUS	1.6	-75.633333	480	15/02/1974	15/10/1977
<u>44035030</u>	<u>MACAGUAL</u>	<u>CON</u>	<u>MET</u>	<u>HA</u>	<u>ACT</u>	<u>1.49972</u>	<u>-75.661</u>	<u>280</u>	<u>15/02/191</u>	<u>Activa</u>

Fuente: Autor.





**Mapa 3.** Estaciones climáticas e hidrológicas al interior de la cuenca río Hacha.

Fuente: Autor.

## 5.1.4 Hidrografía

### a. Subcuencas

La unidad río Hacha, cuenta con 6 subcuencas de análisis, de las cuales Alto Rio Hacha es la que ocupa mayor área con 28.3% del área total, seguido por Medio Río Hacha, subcuenca que ocupa el 24.1%, Río Caraño con 14.1%, Quebrada el Yumal con 12.6%, Quebrada la Yuca con 11.7%, y Bajo río Hacha la de menor área con 9.2%. Estas subcuencas de análisis se adecuan para el desarrollo del proyecto, partiendo de las subcuencas de análisis elaboradas por 4D Elements – Proyecto USAID, en el año 2016.

**Tabla 2.**

**Tabla 2.** Área en Ha Subcuencas de análisis.

Nombre subcuenca	Área_ Ha
Alto Rio Hacha	13906.3
R. Caraño	6916.2
Medio R. Hacha	11831.0
Q. El Yumal	6205.3
Q. La Yuca	5724.7
Bajo R. Hacha	4521.9
<b>Total</b>	<b>49105.5</b>

Fuente: Autor.

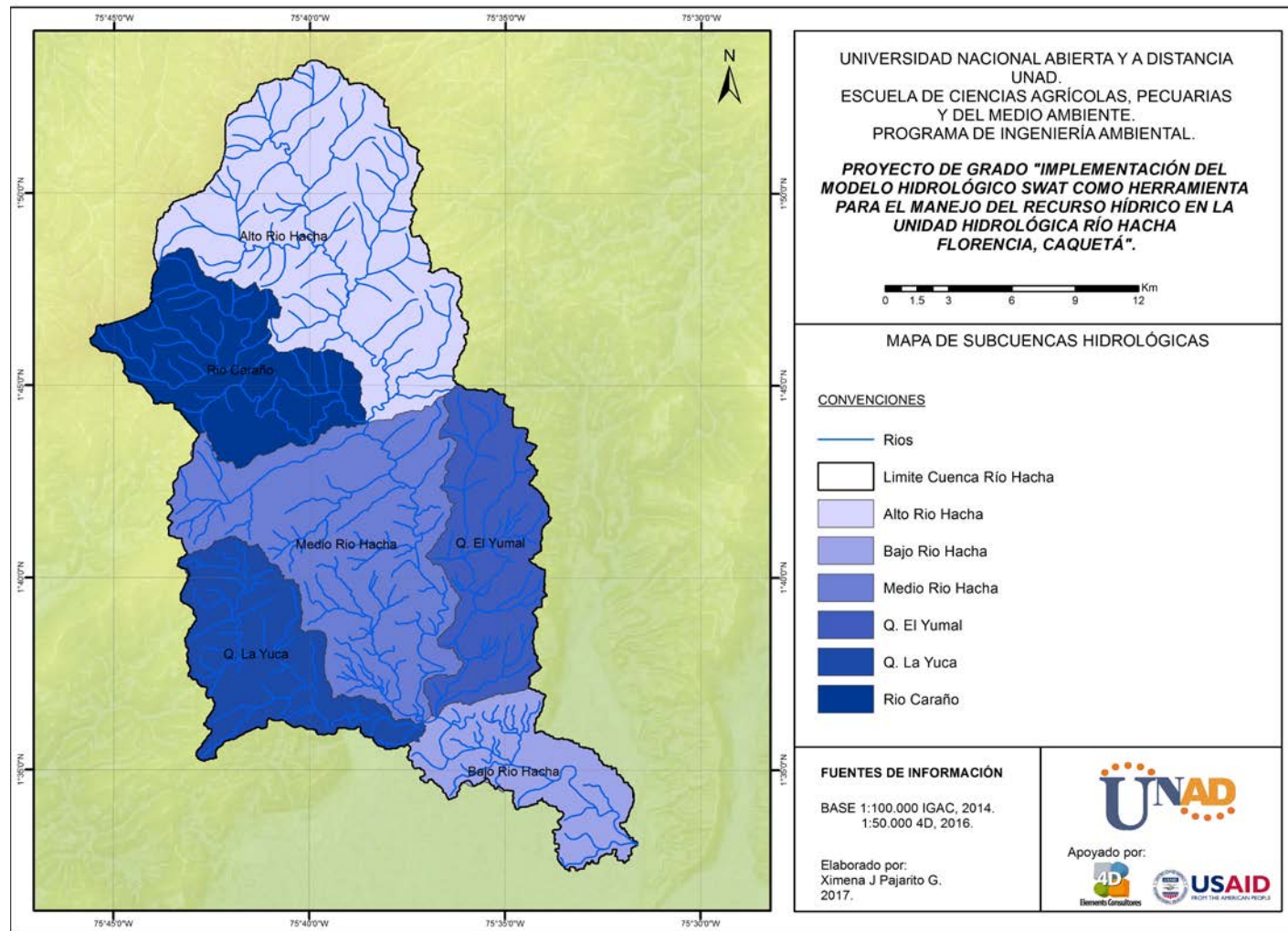
### b. Red hídrica.

Los ríos ubicados al interior de la unidad río Hacha, se encuentran categorizados de acuerdo a su nivel de jerarquía (Método de Strahler), la cual para esta área de estudio, va desde el nivel 1 (nacimientos de agua) hasta el nivel 5 (cuerpos de agua estructurados), analizadas estas categorías se encuentra que el 60% de los cuerpos de agua existentes corresponden a nivel 1, siendo estos los de mayor importancia y mayor cuidado, debido a su estructura hídrica, seguido por cuerpos de agua nivel 2 con 16.7%, nivel 3 con 9.8%, nivel 4 con 6.8% y nivel 5 con 6.2%, en esta última categoría se encuentran el río Hacha.

**Mapa 4.**







**Mapa 4.** Subcuencas de análisis y red hídrica, unidad hidrológica río Hacha.

Fuente: Autor.

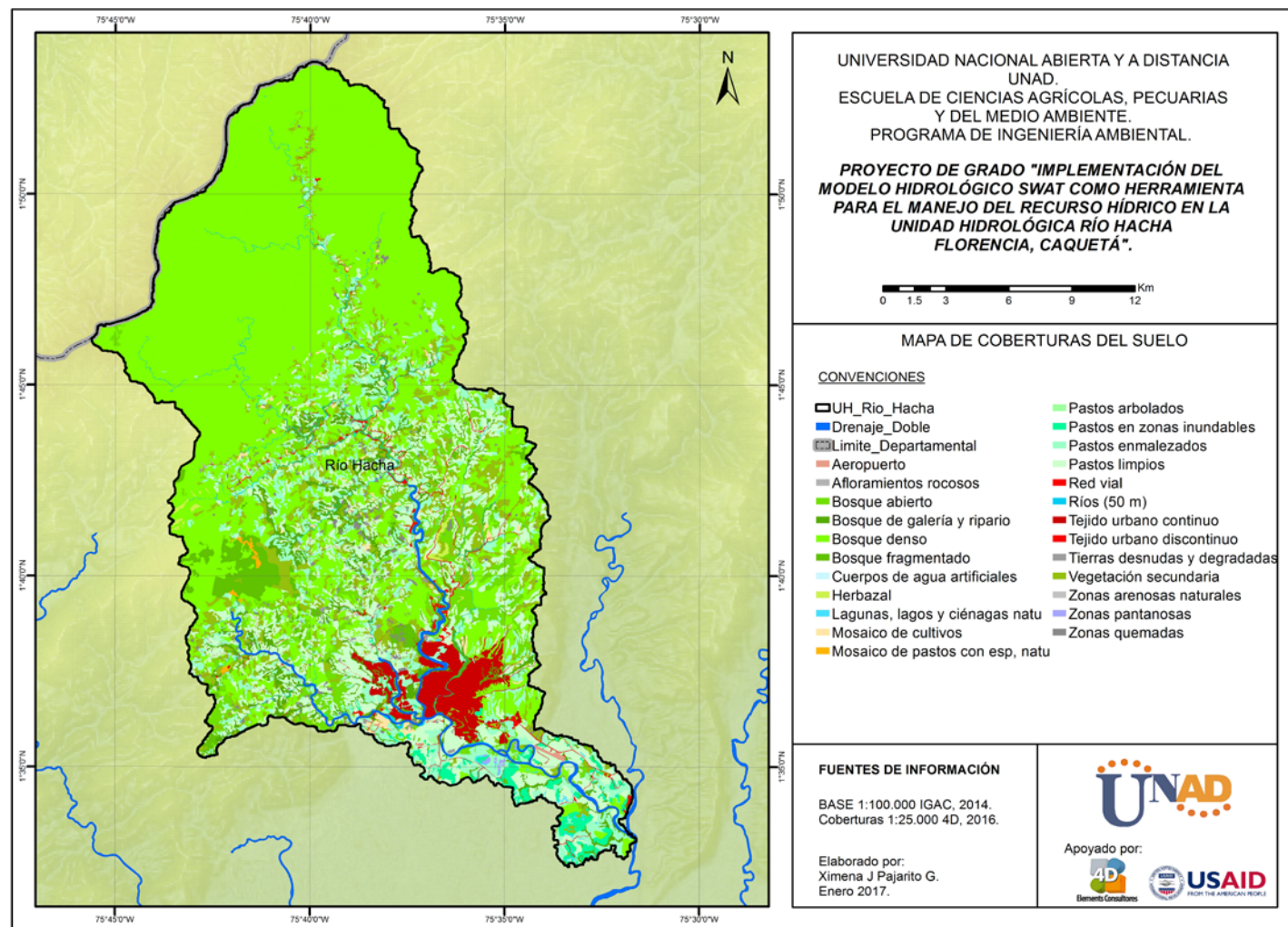
### 5.1.5 Coberturas de la tierra

Las coberturas de la tierra (4D Elements), encontradas al interior de la unidad hidrológica río Hacha, se componen principalmente por “Bosques y pastos” con un 63.9% del área, siendo el bosque denso el que tiene mayor área, seguido por los territorios agrícolas con 21.9%, vegetación secundaria con 7.6%, territorios artificializados con 3.7% y coberturas con menor área como son cuerpos de agua 1.4%, áreas degradadas 1.1%, herbazales 0.3% y vegetación de pantano 0.1%. **Tabla 3** y **Mapa 5**.

**Tabla 3.** Área de coberturas de la tierra unidad río hidrológica Hacha.

Cobertura de la tierra	Área	%
Áreas degradadas	520.0	1.1
Bosques y pastos	31335.0	63.9
Cuerpos de agua	720.0	1.4
Herbazales	160.0	0.3
Territorios agrícolas	10740.0	21.9
Territorios artificializados	1840.0	3.7
Vegetación de pantano	40.0	0.1
Vegetación secundaria	3750.0	7.6
<b>Total</b>	<b>49105</b>	<b>100.0</b>

Fuente: Autor.



**Mapa 5.** Coberturas de la tierra unidad Hidrológica río Hacha.

Fuente: Adaptado por el autor de 4D Elements.

## 5.1.6Uso del Suelo

El estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Caquetá, a escala (1:100.000) generado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi en el año 2000; muestra que al interior del río Hacha hay 21 unidades cartográficas, distribuidas como se observa en la **Tabla 4**, de estas unidades cartográficas se recopila la información de 21 perfiles modales y se identifica que la mayor parte del territorio (87%) corresponde a zonas de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias; igualmente se observa que más del 60% es un suelo fuertemente ácido y en su mayoría un suelo con buen sistema de drenaje.

**Mapa 6.**

**Tabla 4.** Unidades cartográficas al interior del río Hacha.

Unidad Cartográfica	Área Ha	%
CA	444.8	0.9
LVAC	37.0	0.1
LVAC	587.9	1.2
LVAD2	1051.5	2.1
LVEA	1.6	0.0
MKAG	5299.3	10.8
MPAE	3627.0	7.4
MPAF	5529.1	11.3
MPAG	5703.6	11.6
MVAE	4668.3	9.5
MVAF	16648.7	33.9
MVAG	369.6	0.8
MVBD	1030.2	2.1
MVEA	339.0	0.7
PVAB	153.4	0.3

Unidad Cartográfica	Área Ha	%
PVAC	275.4	0.6
PVDB	4.2	0.0
VVAA	2436.8	5.0
VVCA	326.9	0.7
VVDA	273.5	0.6
ZU	298.3	0.6
<b>Total</b>	49105.9	100.0

Fuente: Autor.





## 6. Metodología

La metodología a emplear en el presente trabajo se fundamenta en el desarrollo de cinco fases, las cuales se describen de manera detallada en la **Figura 1**.



**Figura 1.** Metodología de cálculo del balance hídrico.

Fuente: Autor.

## 6.1 Fase I. Generación y recopilación de la información básica y temática del área de estudio

En esta fase partiendo de un criterio hidrológico el cual afirma que la delimitación de cuencas se basa en la altitud del terreno, se realiza el ajuste de las subcuencas hidrológicas a una escala 1:50.000, esto con ayuda del software (Arcgis) de sistemas de información geográfica con la extensión del ArcHydrology, haciendo uso de la información de la cartografía base de la zona de estudio, la red hídrica oficial de Colombia y el modelo digital del terreno con resolución de 12 metros. Paralelamente, se realiza un análisis de la información climática disponible de temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, en formato diario de las estaciones climáticas existentes en la zona de estudio.

Igualmente, se efectúa la consolidación de las variables fisicoquímicas del suelo, información disponible en el estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Caquetá, a escala (1:100.000), y adicionalmente a partir de imágenes de satélite se genera el mapa de cobertura y uso del suelo a una escala de (1:50.000) de acuerdo a la metodología Corine Land Cover. La información requerida para la implementación total del modelo, se detalla en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Detalle de información requerida para el desarrollo del proyecto.

Tipo de Información	Fuente	Escala	Año
Estaciones climáticas (precipitación y temperatura)	IDEAM	Diaria	2005 - 2015
Estación limnográfica (Caudal)	IDEAM	Diaria	2010 - 2015
Perfiles de suelos	IGAC	100.000	2000
Mapa de suelos	IGAC	100.000	2000
Mapa de coberturas	4D	50.000	2016
Subunidades hidrológicas	4D	50.000	2016



Tipo de Información	Fuente	Escala	Año
Red hídrica	IGAC	100.000	2014
Mapas base (Departamentos, municipios, ríos)	IGAC	100.000	2000
Estudio Nacional del Agua	IDEAM	100.000	2014
Modelo digital del terreno.	ASF	12 metros	2016

Fuente: Autor.

## 6.2 Fase II: Aprestamiento de la información

En esta fase se realiza el aprestamiento de la información recopilada de acuerdo a los formatos requeridos por el modelo SWAT; aquí se lleva a cabo la depuración de datos no válidos, se crean las bases de datos, y se revisa la información cartográfica generada y disponible.

## 6.3 Fase III: Implementación del modelo

En esta fase, con los datos organizados y depurados se inicia el proceso de implementación del modelo SWAT, mediante la manipulación de la extensión de ArcSWAT en la interfaz de ArcGis denominada ArcMap, este proceso requiere seguir una serie de pasos en un orden específico como lo relaciona el programa; en cada uno de estos se debe introducir información de la zona de estudio con fin de ir calculando los parámetros hidrológicos que genera el programa. Inicialmente se debe crear un proyecto, seleccionado el lugar de almacenamiento y la ubicación de los datos, seguido de esto se inicia el proceso de delimitación de las subcuencas mediante el uso del DEM y los ríos principales (para este proyecto ya se contaba con estas subcuencas por lo tanto se introducen al programa automáticamente), se calculan los parámetros morfométricos de la cuenca, posteriormente se introduce la información de usos del suelo y tipos del suelo, los cuales se reclasifican de acuerdo a las categorías del programa y se generan nuevos SHP de esta información, seguido se realiza el cálculo y clasificación de la pendiente de la unidad hidrológica de acuerdo a la categorización del IGAC; con estos datos se crean y definen las HRU. En cuanto a los datos climáticos, se inicia introduciendo la información de ubicación de las

estaciones climáticas, seguido por la introducción de la información estadística generada de acuerdo a las series históricas de todas las estaciones (esta estadística se realiza bajo la implementación de un software denominado MACROWGN). Y finalmente se realiza la simulación del balance hídrico con todos los datos introducidos al programa. Esta simulación verifica que la información se encuentre geolocalizada al interior de la unidad hidrológica objeto de estudio e inicia el proceso de creación de bases de datos de salida, con los cuales posteriormente se realiza la respectiva calibración del modelo hidrológico.

## **6.4 Fase IV: Calibración del modelo**

Se continúa con la calibración del mismo; en esta fase se emplean los datos de caudal resultantes del anterior proceso y los datos reales de la estación limnigráfica que se ubica en la salida de la unidad hidrológica río Hacha, la calibración para este trabajo de investigación se realiza de forma “Prueba Error” de acuerdo a lo establecido por el ingeniero Cabrera en su documento de *Calibración de modelos hidrológicos*, aplicando la ecuación de coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe, la cual muestra la relación que existe entre el caudal observado por el tiempo de simulación (5 años) con el caudal simulado por el programa, dividido por el promedio del caudal observado en el periodo tiempo de calibración. Para el presente trabajo se decide realizar la calibración con esta ecuación debido a que la calibración de forma automática presento errores que no permitieron evaluar si los datos simulados corresponden con la realidad del terreno.

## **6.5 Fase V: Análisis de los datos obtenidos**

En esta fase de acuerdo a los datos obtenidos en la anterior fase se evalúan los puntos con mayor potencialidad hídrica, encontrados mediante la implementación del modelo SWAT; con los datos obtenidos mediante el análisis del proceso se espera aportar en los lineamientos para el manejo del recurso hídrico en la zona de estudio.

## **7.Implementación del modelo SWAT**

### **7.1 Generación y recopilación de la información**

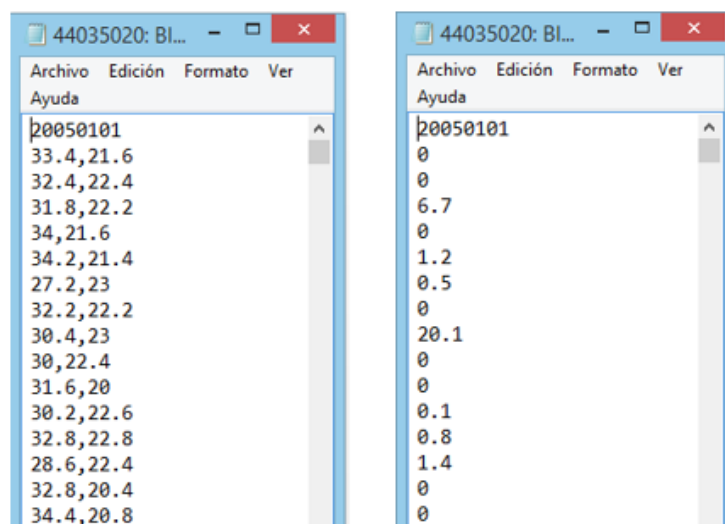
La información específica de subunidades de análisis y coberturas de la tierra, es información generada para la zona, a partir del análisis de imágenes satelitales y el uso de sistemas de información geográfica. Así mismo, requiere del ajuste de la misma teniendo en cuenta la implementación del modelo, y la demás información disponible. En cuanto a la información climática, esta fue obtenida de las bases de datos de IDEAM, de la cual se cuenta con dos estaciones climáticas ubicadas al interior de la zona de estudio y una estación climática cercana al área de estudio, para los parámetros de precipitación y temperatura. Para el parámetro de caudal, se cuenta con la información de una estación limnográfica, ubicada a la salida de la unidad hidrológica.

En cuanto a las características físicoquímicos del suelo, se obtienen datos del estudio general de suelos y zonificación del departamento del Caquetá; sin embargo, se hace necesario realizar cálculos de algunas variables con las cuales no cuenta el estudio. El modelo digital del terreno (DEM), se obtiene del Servicio de Satélites de Alaska – Radiometría terrestre, Satélite Alos, con un detalle de 12 metros.

## 7.2 Tratamiento de la información

Posterior a la recopilación de la información, se realiza un proceso detallado en la construcción de las bases de datos requeridas por el programa. Para esta fase se hizo necesario el cálculo de algunas variables de las características del suelo y la ponderación de las variables de clima, mediante la implementación de diferentes softwares.

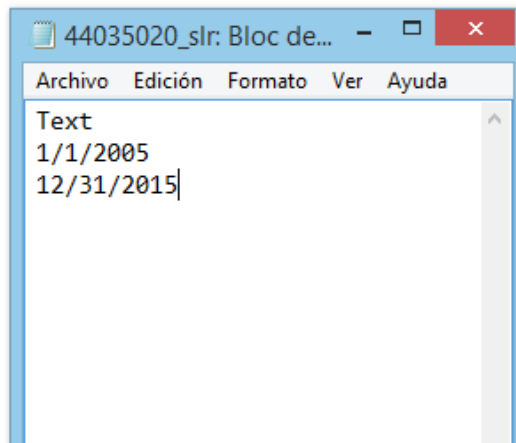
**Clima:** Inicialmente se recibe la información climática del área de estudio por parte del IDEAM, la cual se encuentra en formato no legible para el programa, por lo tanto es necesario la creación de un archivo por cada una de las variables climáticas, de cada una de las estaciones a usar, creando así seis (6) archivos por cada una de las estaciones; en el caso de precipitación y temperatura, variables en las cuales se tienen datos, se realiza la organización de los datos bajo el formato establecido como se observa en la **Figura 2**. En el caso de las demás variables climáticas se crean archivos vacíos debido a que no se cuenta con esta información, sin embargo cabe resaltar que cada uno de estos archivos debe contener la información observada en la **Figura 3**.



Station	Date	Precipitation (mm)	Temperature (°C)
44035020	20050101	33.4	21.6
		32.4	22.4
		31.8	22.2
		34	21.6
		34.2	21.4
		27.2	23
		32.2	22.2
		30.4	23
		30	22.4
		31.6	20
		30.2	22.6
		32.8	22.8
		28.6	22.4
		32.8	20.4
		34.4	20.8

**Figura 2.** Formato variables climáticas por estación.

Fuente: Autor.



**Figura 3.** Formato variables climáticas vacías por estación.

Fuente: Autor.

Con la información climática organizada, se lleva a cabo un cálculo estadístico (promedio, y desviación estándar) de cada una de las variables climáticas disponibles para el proceso, en este caso precipitación y temperatura, estos cálculos se realizan mediante el software ejecutable Macro WGN, el cual es recomendado en la plataforma de SWAT. Estas deben ser posteriormente introducidas a la base de datos legible para el programa.

**Caudales:** Para llevar a cabo la calibración del modelo, se hace necesario contar con la información de caudales de la estación de salida de la unidad hidrológica río Hacha, con una serie histórica de mínimo 5 años, para este caso se recibe la información de la estación denominada Venecia, ubicada a la salida de la unidad con serie histórica consistente del año 2010 al 2015. Esta estación también tuvo que ser procesada en el mismo formato de las estaciones mencionadas anteriormente, debido a que el programa que permite la calibración “SWAT CUP”, requiere estos datos organizados. Al realizar esta calibración, el modelo es validado de acuerdo a los datos medidos y comparado con los datos simulados.

**Suelos:** Con la información recibida por parte de IGAC, del estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Caquetá, a escala (1:100.000), se realiza una transcripción de los parámetros fisicoquímicos de 21 perfiles modales ubicados al interior de la unidad hidrológica río Hacha, de estos datos se obtienen 12 parámetros (Unidad Cartográfica, Taxonomía, porcentaje de cada taxonomía al interior de cada unidad

cartográfica, perfil, horizonte, % de arena, % arcilla, % de limo, textura, pH, %carbono y % de materia orgánica), para el funcionamiento del SWAT es necesario contar con la información de 19 parámetros, por lo cual los siete (7) faltantes (Grupo hidrológico, densidad aparente del suelo, capacidad de agua disponible, conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica, albedo del suelo, usle) se calculan mediante el uso de diferentes herramientas, como se presenta a continuación:

Grupo hidrológico: Corresponde a las características de infiltración del agua en el suelo, basado en los cálculos del potencial de escorrentía, esta se clasifica en suelos con las mismas características. Para el presente estudio la clasificación se realizó con los datos designados en la tabla del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, llegando a asignar a cada uno de los perfiles modales un grupo hidrológico de los cuatro posibles (A, B, C o D). **Tabla 6, Tabla 7 y Mapa 7.**

**Tabla 6.** Descripción de grupos hidrológicos.

Grupo Hidrológico	Descripción
A	Agrupar los tipos de suelo que presentan alto índice de infiltración, cuando están completamente húmedos. Se compone por suelos arenosos, bien drenados o altamente drenados, o arenas con textura gruesa. Estos suelos transmiten grandes cantidades de agua. (Arenosos y Arenoso – Limoso)
B	Agrupar los suelos que presentan moderado índice de infiltración, cuando están completamente húmedos. Se compone por suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados o bien drenados, con textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Tienen una tasa moderada de transmisión de agua. (Franco, franco – arcilloso – arenoso, Franco – limoso).
C	Agrupar suelos que presentan lento índice de infiltración, cuando están completamente húmedos. Estos suelos cuentan con una capa que impide el movimiento del agua, son suelos de textura

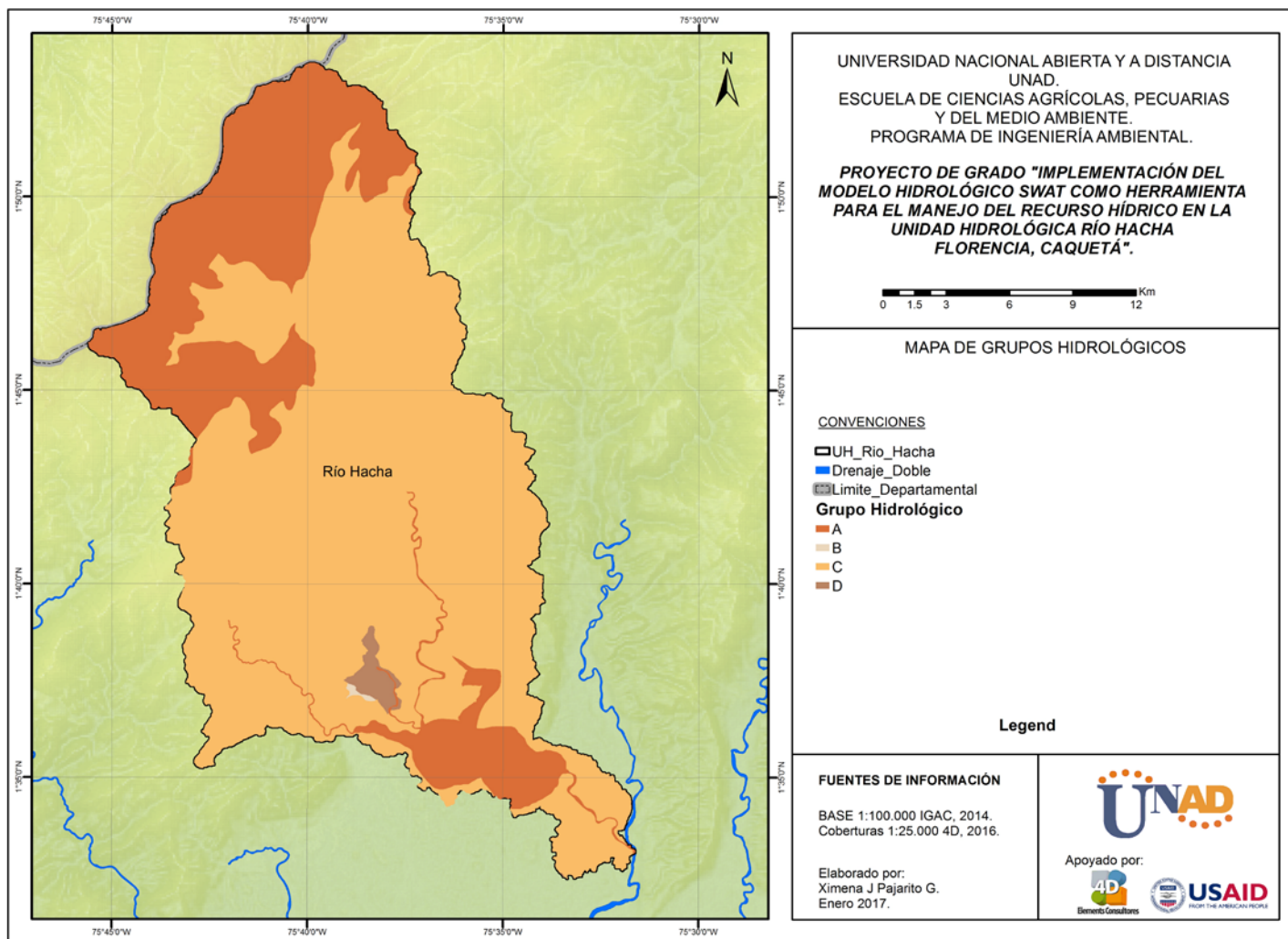
Grupo Hidrológico	Descripción
	moderadamente fina a fina. Tienen una tasa lenta de transmisión de agua (Franco – arcilloso, Franco – arcilloso – limoso, Arcillo – arenoso).
D	Agrupar suelos que presentan muy lento índice de infiltración, por ende alto índice de escorrentía, cuando están completamente húmedos. Son suelos principalmente arcillosos, con alto nivel freático, poco profundos que presentan una capa casi impermeable. La tasa de transmisión de agua de estos suelos es muy lenta.

Fuente. SCS.

**Tabla 7.** Clasificación grupos hidrológicos.

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
<b>A</b>	Rápida	Capacidad de infiltración > 76 mm /h	Arenosa Arenosa – limosa
<b>B</b>	Moderada	Capacidad de infiltración 76 - 38 mm /h	Franco Franco – arcillosa – arenosa Franco - Limosa
<b>C</b>	Lenta	Capacidad de infiltración 36 - 13 mm /h	Franco – arcillosa Franco – arcillo – limosa Arcillo arenosa
<b>D</b>	Muy lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm /h	Arcillosa

Fuente: SCS.



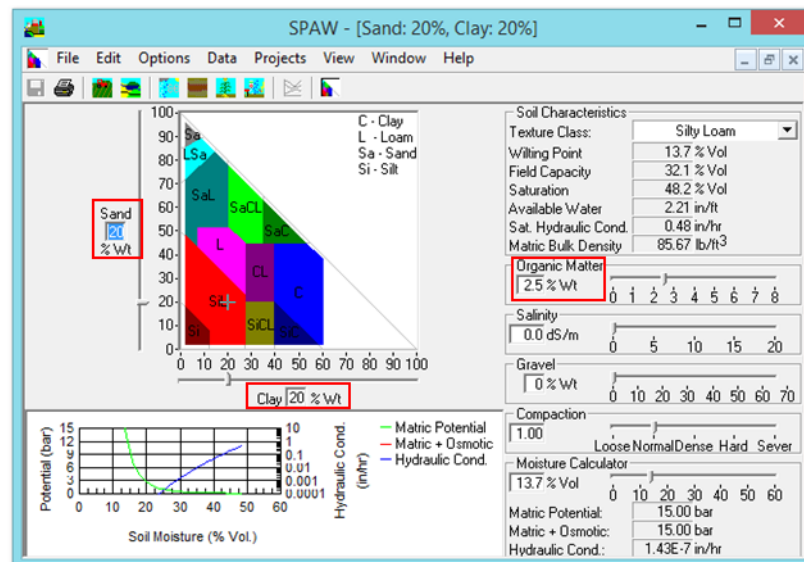
**Mapa 7.** Mapa de grupos hidrológicos al interior de la unidad hidrológica río Hacha.

**Fuente:** Autor



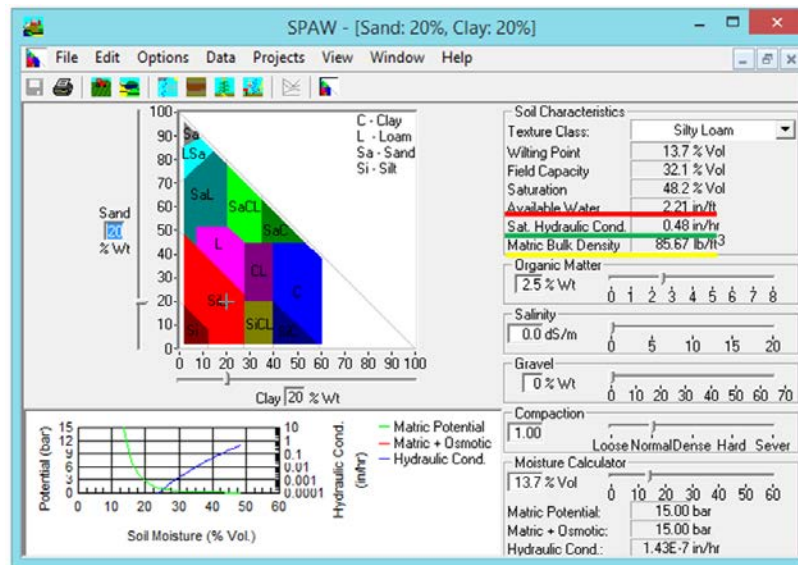
Densidad aparente del suelo: Es el peso de una unidad de volumen del suelo en el cual se incluye el espacio poroso, este parámetro refleja el contenido total de la porosidad del suelo. Esta es una característica importante para el manejo de los suelos, debido a que aporta información para el índice de compactación y permeabilidad. El cálculo de este parámetro se realiza mediante el uso del Software “SPAW”, en el cual se introducen las clases texturales del suelo y este las relaciona con el porcentaje de materia orgánica.

Cabe resaltar que este software, mediante la información de clases texturales (arena y arcilla) y el contenido de materia orgánica, de cada uno de los horizontes de los 21 perfiles, calcula también la capacidad del agua disponible en el suelo y la conductividad hidráulica, otros dos parámetros requeridos en el desarrollo del programa. **Figura 4 y Figura 5.**



**Figura 4.** Interface de SPAW, datos requeridos para el calculo.

Fuente: SPAW.



**Figura 5.** Interface de SPAW, resultados aportados por el programa.

Fuente: SPAW.

Capacidad de agua disponible: Es el agua disponible o aprovechable para las plantas en el suelo, esta se calcula relacionando el punto de marchitez con la capacidad de campo presente en el suelo. En este caso se calcula mediante el software SPAW.

Conductividad hidráulica: Es la capacidad de un suelo poroso para transmitir agua. Esta constituye un concepto más general que la permeabilidad del suelo, dado a que depende no sólo de las características del espacio poroso, sino también de la condición misma del agua. Por tanto, la conductividad hidráulica del suelo depende principalmente de su estructura, del contenido de humedad del suelo y de la temperatura del agua. La conductividad disminuye cuando también lo hace el contenido de humedad, ya que la sección útil de los poros (agua en estado líquido) se ve reducida y la tortuosidad aumenta. Por estas razones la conductividad hidráulica se considera como una función del contenido de agua del suelo (Klute & Dirksen, 1986). Para este caso este parámetro se calcula mediante el software SPAW.

Contenido de materia orgánica: Es conocida como (MO) un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y/o vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y que se

acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo (Rosell, 1999). Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos (Aguilera, 2000). El CO es el principal elemento que forma parte de la MO, relacionando alrededor de un 58%, dado lo anterior es común encontrar la confusión entre ambos términos. Por lo tanto es importante explicar que el CO se obtiene por métodos analíticos (carbono orgánico húmedo o seco) y la MO se estima a partir del CO multiplicado por un factor empírico como el de van Benmelen equivalente 1,724 (Jackson, 1964). **Ecuación 2.**

**Ecuación 2.** Calculo materia orgánica. Van Benmelen.

$$Mo = Co * 1.724$$

Fuente: Jackson, 1964

Albedo del suelo: Este es el porcentaje de radiación solar que se refleja por el suelo a capacidad de campo. Permite evaluar la insolación total del suelo, razón que lo lleva a ser importante en el cálculo del balance hídrico. Para el presente estudio se calculó mediante la **Ecuación 3**, propuesta por Baumer en 1990, está relacionando la cantidad de materia orgánica en el suelo, permite el cálculo correspondiente.

**Ecuación 3.** Calculo de Albedo del suelo.

$$A = \frac{0.6}{\exp(0.4 \cdot MO)}$$

Fuente: Baumer (1990).

Donde:

$Mo = \% \text{ materia orgánica}$

Factor de Erodabilidad del suelo: Se calcula con base en la ecuación universal de pérdida del suelo (Universal Soil Loss Equation) de Wischmeier y Smith (1962). La cual fue diseñada con el propósito de tratar de cuantificar la erosión hídrica en una unidad hidrológica, partiendo de distintos factores que implica este proceso del suelo; como la textura, la estructura, porcentaje de materia orgánica y permeabilidad. Esta ecuación es una fórmula empírica, resultado de 10.000 ensayos realizados bajo las condiciones de los suelos de Estados Unidos, obtenidos de parcelas experimentales, con lluvia artificial.

**Ecuación 4.** Cabe resaltar que para desarrollar esta ecuación es necesario calcular antes tres factores M (**Ecuación 5**), B (**Tabla 8**) y C (**Tabla 9**).

#### **Ecuación 4.** Calculo del factor de erodabilidad USLE.

$$Usle = \frac{((((2,1 * \text{Factor } M^{1,4}) * 10^{(-4)}) * (12 - Mo)) + 3,25 * (\text{Factor } B - 2) + 2,5 * (\text{Factor } C - 3)) * 1,2928}{100}$$

Fuente: Wischmeier y Smith.

- **Factor M:** Representa la relación textural de la capa superficial del suelo. Calculada como el producto del porcentaje de partículas comprendidas entre 0.002 y 0.05 mm de diámetro (%Limo) y el porcentaje de partículas comprendidas entre 0.05 y 2 mm de diámetro (%Arena), esto por el producto de 100 menos el porcentaje de arcilla.

#### **Ecuación 5.** Calculo Factor M.

$$\text{Factor } m = (\%limo + \%arena) * (100 - \%arcilla)$$

Fuente: Correa Oscar (2003).

- **Factor B:** Este factor corresponde al valor de granulometría del suelo. Calculado mediante las características de la clase estructural del suelo (grado, forma y tamaño). **Tabla 8.**

**Tabla 8.** Factor B, codificación estructural del suelo

ESTRUCTURA			
GRADO	FORMA	TAMAÑO	CODIGO (Factor B)
Sin estructura		Muy fina	4
Débil	Granular	Media	3
	Bloqueangulares	Media	3
Moderada	Granular	Muy fina	1
		Fina	2
		Media	2
	Bloqueangulares	Muy fina	2
		Media	2
Fuerte	Granular	Media	2
	Bloqueangulares	Fina	2

Fuente USDA

- **Factor C:** Correlaciona la permeabilidad del suelo con la clase textural de cada uno de los perfiles del suelo, así se asigna un código que representa la permeabilidad. **Tabla 9.**

**Tabla 9.** Factor C, codificación permeabilidad del suelo

TEXTURA CLASE	PERMEABILIDAD	CÓDIGO (Factor C)
Arcilla	Muy Lenta	6
Arcillo arenoso, Arcillo Limoso, franco arcillo limoso	Lenta	5
Franco arcilloso arenoso, franco arcilloso	Lenta o moderada o moderadamente lenta	4
Franco limoso, Franco	Moderada	3
Areno francoso, franco arenoso	Moderada a rápida o medianamente rápida	2
Arena	Rápida a muy rápida	1

Fuente USDA

**Coberturas:** Contando con la capa de coberturas de la tierra para el área de estudio, es necesario realizar una reclasificación de las categorías de cobertura por la clasificación asignada por el SWAT, recordando que inicialmente estas se encuentran bajo la metodología de Corine Land Cover. **Tabla 10.**

**Tabla 10.** Clasificación coberturas SWAT

Cobertura	Código SWAT
Mosaico de pastos con espacios naturales	AGRL
Mosaico de cultivos	
Afloramiento rocoso	BARR
Tierras desnudas y degradadas	
Zonas quemadas	
Bosque abierto	FRSE
Bosque de galería y ripario	
Bosque denso	

Cobertura	Código SWAT
Bosque fragmentado	FRST
Pastos arbolados	PAST
Pastos en zonas inundables	
Pastos limpios	
Pastos enmalezados	RNGB
Herbazal	
Vegetación secundaria o en transición	
Aeropuerto	URBN
Red vial, ferroviarias y terrenos asociados	
Tejido urbano continuo	
Tejido urbano discontinuo	
Cuerpos de agua artificiales	WATR
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	
Ríos (5m)	
Zonas arenosas naturales	
Zonas pantanosas	WETL

Fuente: SWAT

**Unidades:** Contando el permiso de uso de las subunidades hidrológicas del área de estudio, suministradas por la empresa 4D Elements (Información proyecto USAID), se procede a realizar el ajuste de las mismas, con el fin de obtener 6 subunidades de análisis, para el desarrollo del proyecto, como se observa en la descripción del área de estudio.

## 7.3 Resultados y discusión

### 7.3.1 Balance hídrico

Ingresada la información requerida por el modelo SWAT, se realiza la implementación de este modelo matemático, mediante el uso de los sistemas de información geográfica, proceso del cual se obtiene como resultados el cálculo de las diferentes variables climáticas para el área de estudio y para cada una de las subcuencas de análisis se realiza el cálculo de acuerdo al área. **Tabla 11.** Cada una de estas variables comprende un comportamiento hidrológico para la unidad hidrológica río Hacha, como también para cada una de las subcuencas de análisis, y a su vez la relación existente entre estas. **Tabla 12.**

El análisis realizado para cada una de las variables, se realiza de forma conjunta por toda la unidad hidrológica río Hacha, relacionando los valores correspondientes a las subcuencas y sus respectivas áreas.



**Tabla 11.** Datos hidrológicos, obtenidos de la simulación con SWAT.

Unidad de análisis	Área Km <sup>2</sup>	Precipitación mm	Evapotranspiración potencial mm	Evapotranspiración real mm	Percolación mm	Escurrentía mm	Flujo de retorno mm	Caudal total mm	Flujo lateral mm	Sedimentos Ton/Ha	Oferta Hídrica Global mm	Demanda de la cobertura
<b>1</b>	139.1	2544.3	102.8	53.3	592.2	269.1	537.6	1844.4	1037.7	5.0	2172.4	49.5
<b>2</b>	69.2	2542.2	102.8	52.4	692.1	170.9	632.3	1851.3	1048.1	4.4	2268.6	50.4
<b>3</b>	118.3	2543.1	103.3	55.6	443.5	609.5	396.2	1823.6	817.9	5.4	1830.4	47.7
<b>4</b>	62.1	2544.1	103.4	55.0	727.6	809.5	665.5	1813.4	338.4	5.7	1631.1	48.4
<b>5</b>	57.2	3164.0	112.0	67.4	540.9	880.2	485.4	2416.5	1050.9	5.4	2171.8	44.7
<b>6</b>	45.2	2174.4	102.8	68.8	460.3	722.2	427.7	1960.1	810.2	5.2	1349.4	34.0
<b>Total</b>		2585.4	104.5	58.8	576.1	576.9	524.1	1951.6	850.5	5.2	1904.0	45.8

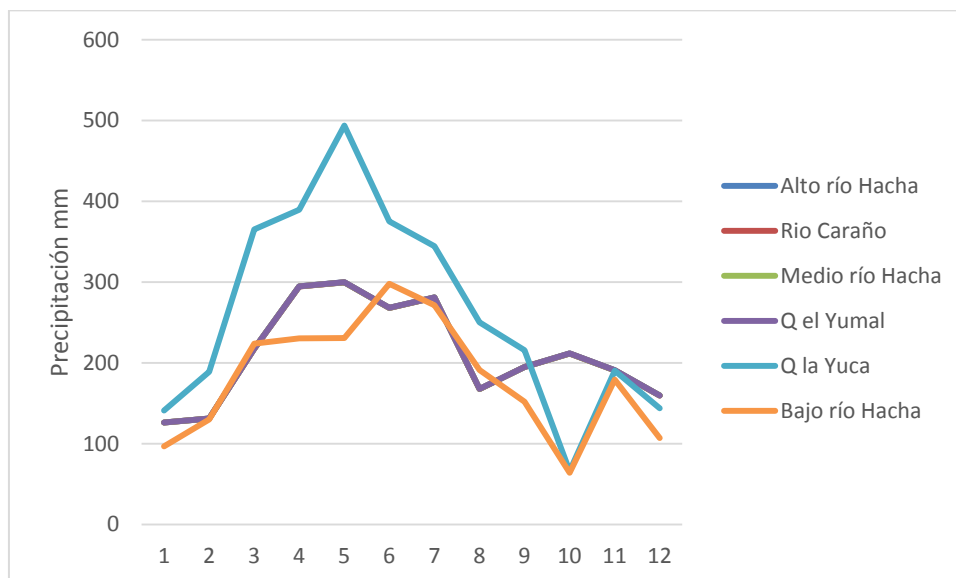
Fuente: Autor.

**Tabla 12.** Relación variables balance hídrico.

Relaciones del balance hídrico	%
Esorrentía vs Precipitación	22
Percolación Vs Precipitación	22
Evapotranspiración Vs Precipitación	2.3
Flujo lateral vs Caudal total	43
Esorrentía Vs Caudal total	29
Recarga de acuíferos Vs Precipitación	2

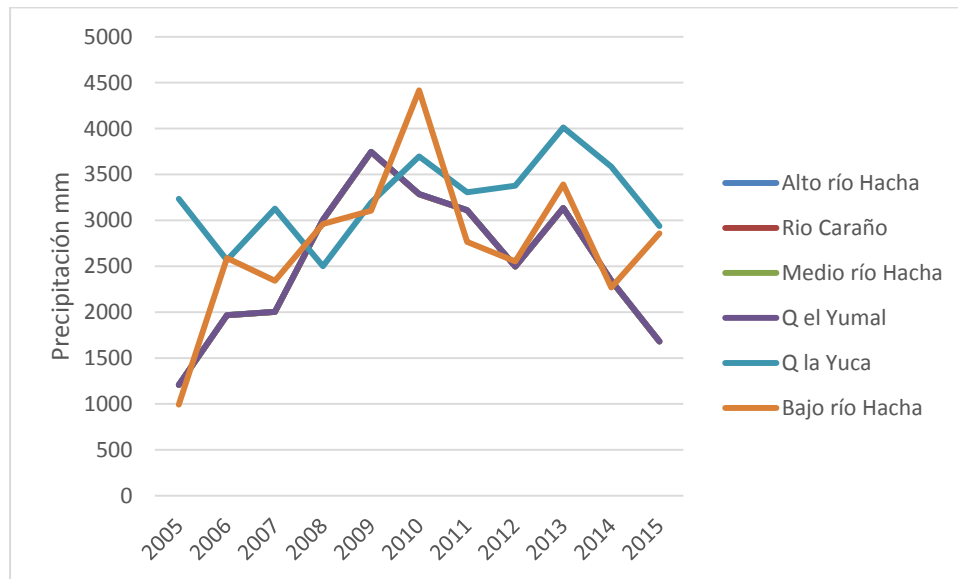
Fuente: Autor.

**Precipitación (Promedio anual multianual):** Los datos evaluados para esta variable climática corresponden al periodo comprendido entre los años 2005 - 2015 (11 años), de estos datos se obtuvo que la precipitación promedio anual multianual para la unidad hidrográfica río Hacha es de 2.585 mm, con un régimen monomodal, con temporada alta de lluvias en los meses de abril a junio. **Figura 6.** Así como también, se encontró que los años 2009 y 2010, son los que presentan niveles de lluvia más altos, con respecto al periodo analizado. **Figura 7.**



**Figura 6.** Comportamiento precipitación mensual, por subunidad de análisis.

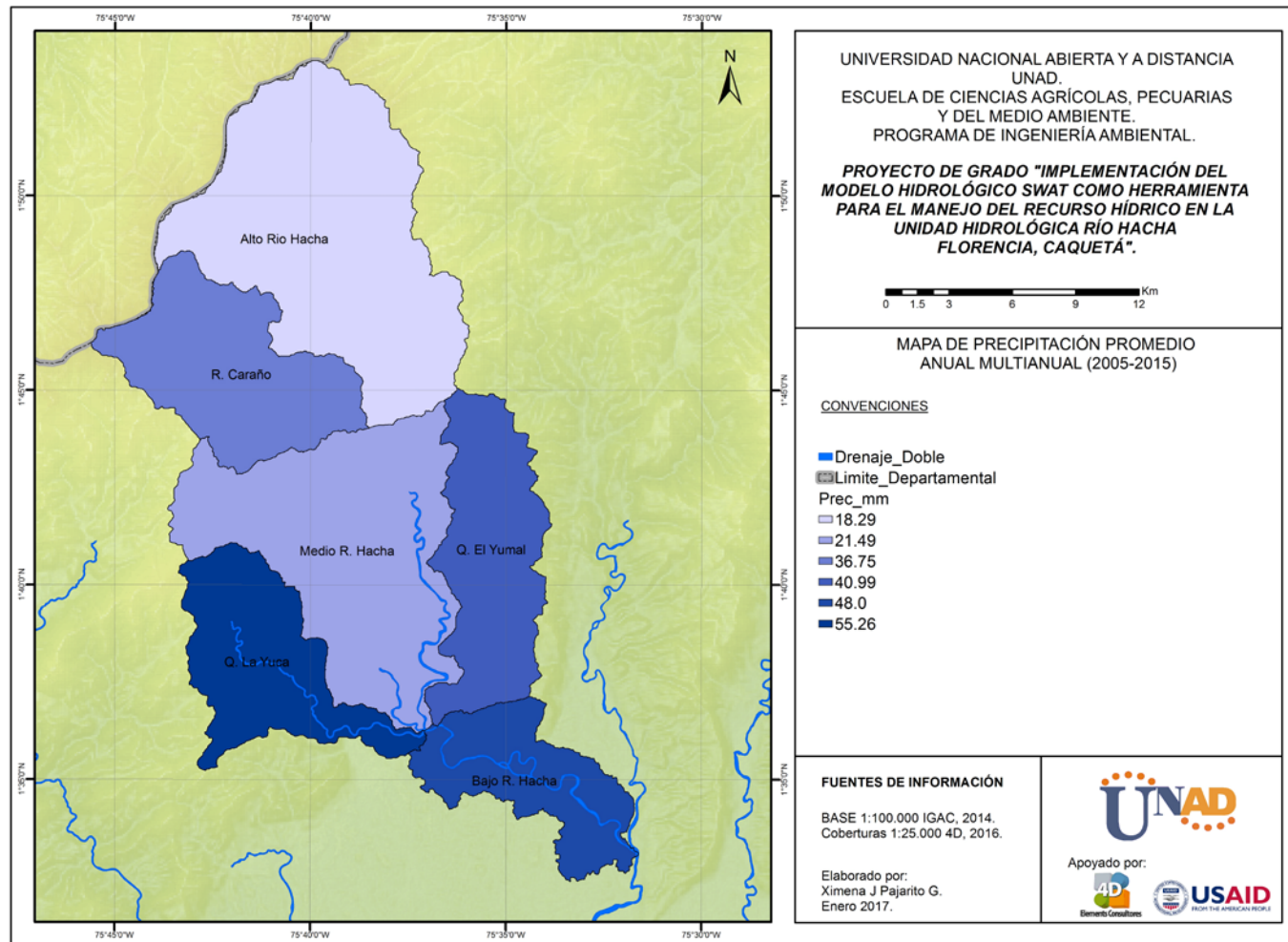
Fuente: Autor.



**Figura 7.** Comportamiento precipitación por subunidad de análisis - anual.

Fuente: Autor.

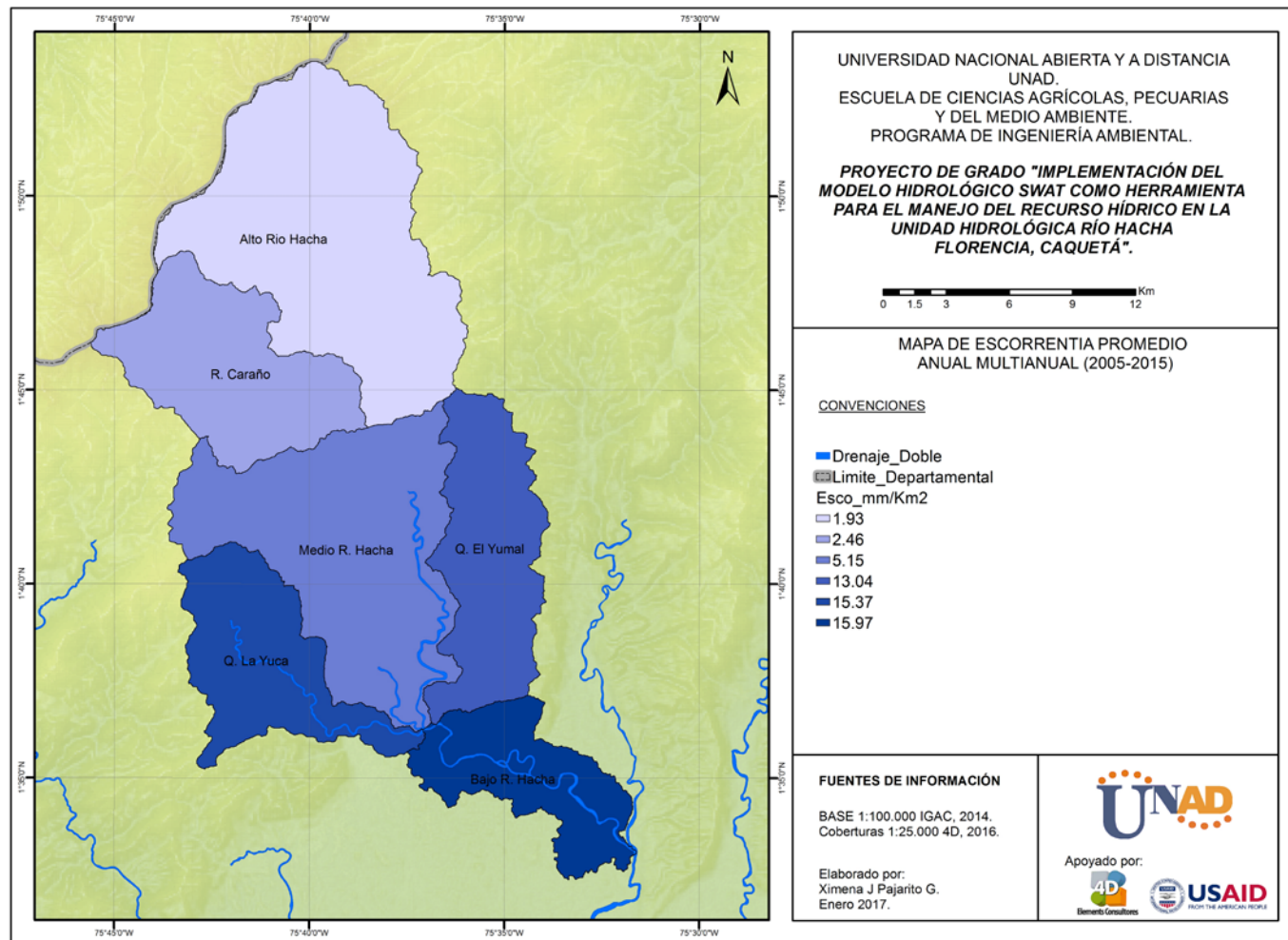
La precipitación entendida como la variable con mayor importancia en el cálculo del balance hídrico, se observaron que los niveles de lluvia por subunidad de análisis presentan un patrón similar, esto teniendo en cuenta que en la parte alta únicamente se contó con la información de una estación climática; no obstante, se encontró que la subunidad Quebrada la Yuca, es la que presenta mayor nivel de precipitación en el área de estudio, con un promedio anual multianual de 55.27 mm/km<sup>2</sup>, seguido por el río Bajo Hacha y Quebrada el Yumal con 48.09 y 40.99 mm/km<sup>2</sup>, Medio río Hacha con 36 mm/km<sup>2</sup>, río Caraño con 21.49 mm/km<sup>2</sup> y Alto río Hacha con 18.29 mm/km<sup>2</sup>. **Mapa 8.**



**Mapa 8.** Precipitación promedio anual multianual.

Fuente: Autor.

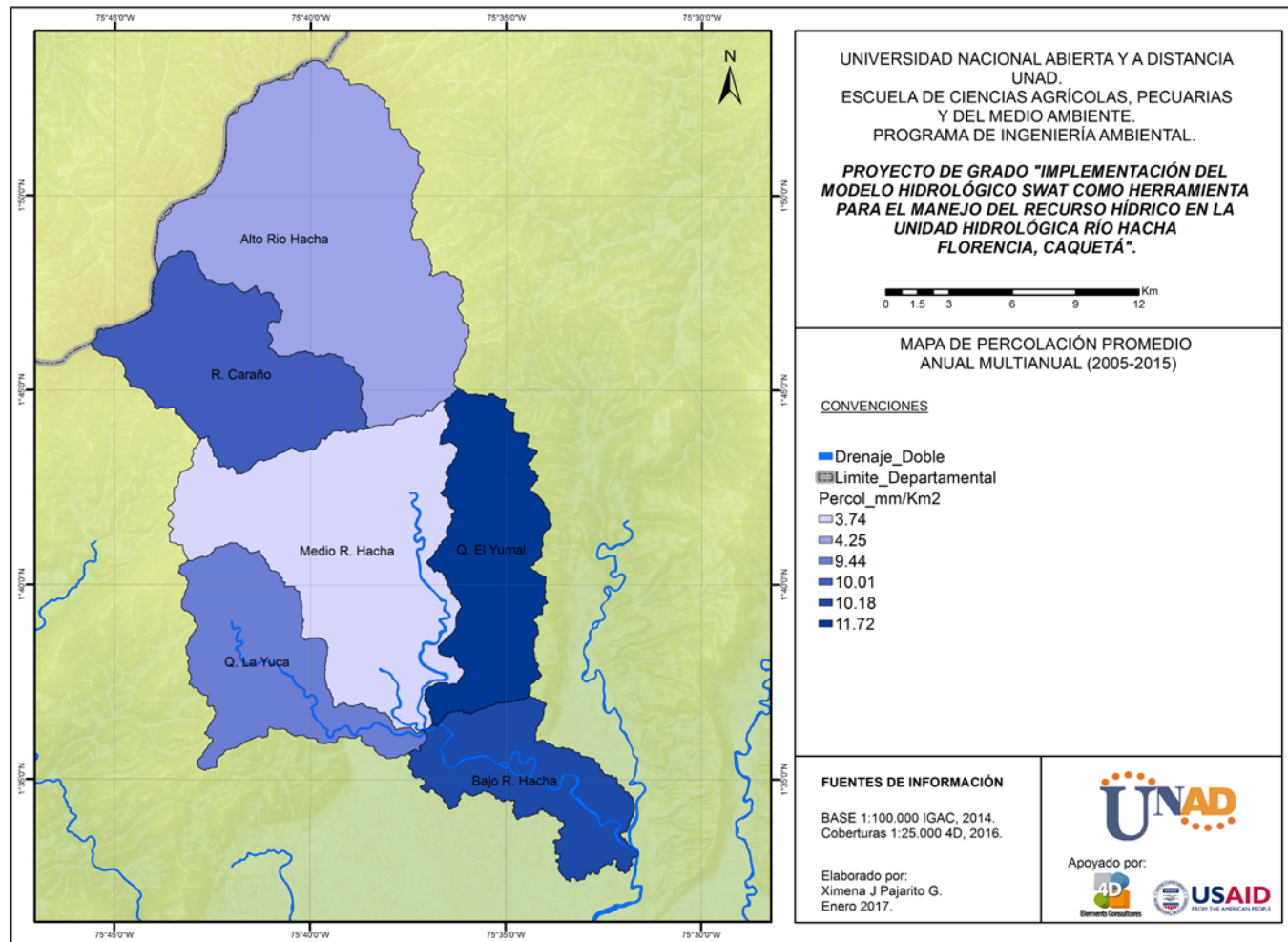
**Escorrentía (Promedio anual multianual):** Relacionando el total de la precipitación para la unidad hidrológica (Entrada), se encontró que el 22% se considera escorrentía superficial, siendo la subunidad de análisis “Bajo rio Hacha”, la que presenta los niveles más altos de escorrentía superficial (15.97 mm/Km<sup>2</sup>), relacionando esto con el tipo de cobertura existente en esta área se encontró que esta subunidad es una de las que presenta un alto nivel de cobertura transformada, lo que genera que el nivel de escorrentía sea mayor, que en la zona que se cuenta con coberturas naturales. Así mismo, se observó que la subunidad que presenta menor nivel de escorrentía es el río Caraño, el cual por el contrario presenta un alto nivel de cobertura natural, favoreciendo así la disminución de la escorrentía y el aumento de la percolación en el suelo. **Mapa 9.**



**Mapa 9.** Escorrentía superficial, promedio anual multianual.

Fuente: Autor.

**Percolación (Promedio anual multianual):** Tomada como el agua en movimiento vertical en la zona no saturada, se encontró que los niveles de percolación para el área de estudio son mayores en la subunidad de análisis Quebrada el Yumal ( $11.72 \text{ mm/km}^2$ ), seguido por Bajo río Caraño ( $10.18 \text{ mm/km}^2$ ), esto debido principalmente al alto nivel de cobertura natural que presentan estas dos unidades e igualmente al alto nivel de precipitación; por otro lado, la subunidad Medio río Hacha es el que presenta menor nivel de percolación en toda la unidad hidrológica con  $3.74 \text{ mm/km}^2$ , debido principalmente a la presencia de cobertura transformada. Igualmente se encontró que relacionando el total de la precipitación con respecto al nivel de percolación, esta corresponde al 22% de la precipitación promedio anual multianual, para el total del área de estudio. **Mapa 10.**

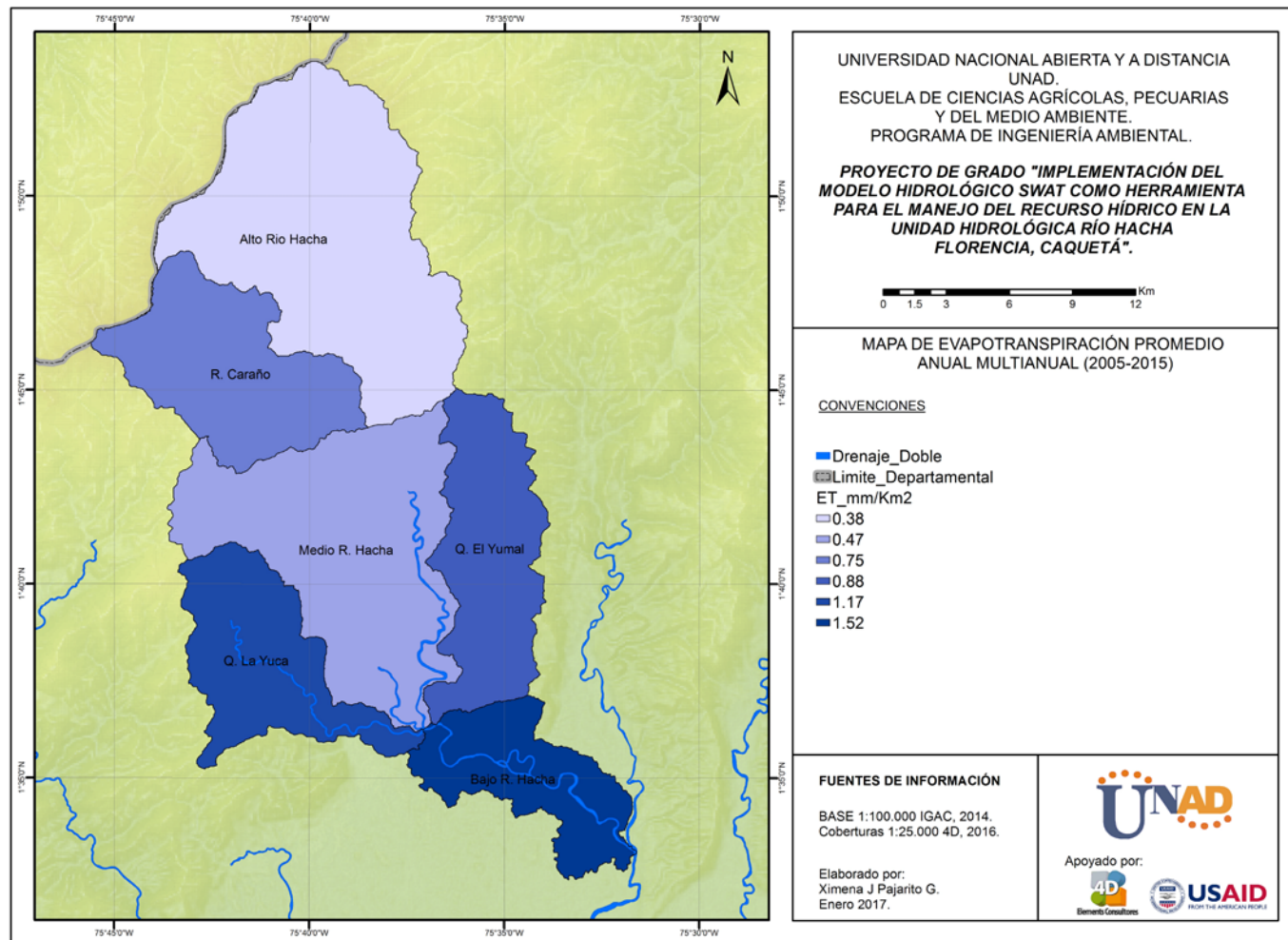


**Mapa 10.** Percolación promedio anual multianual.

Fuente: Autor.



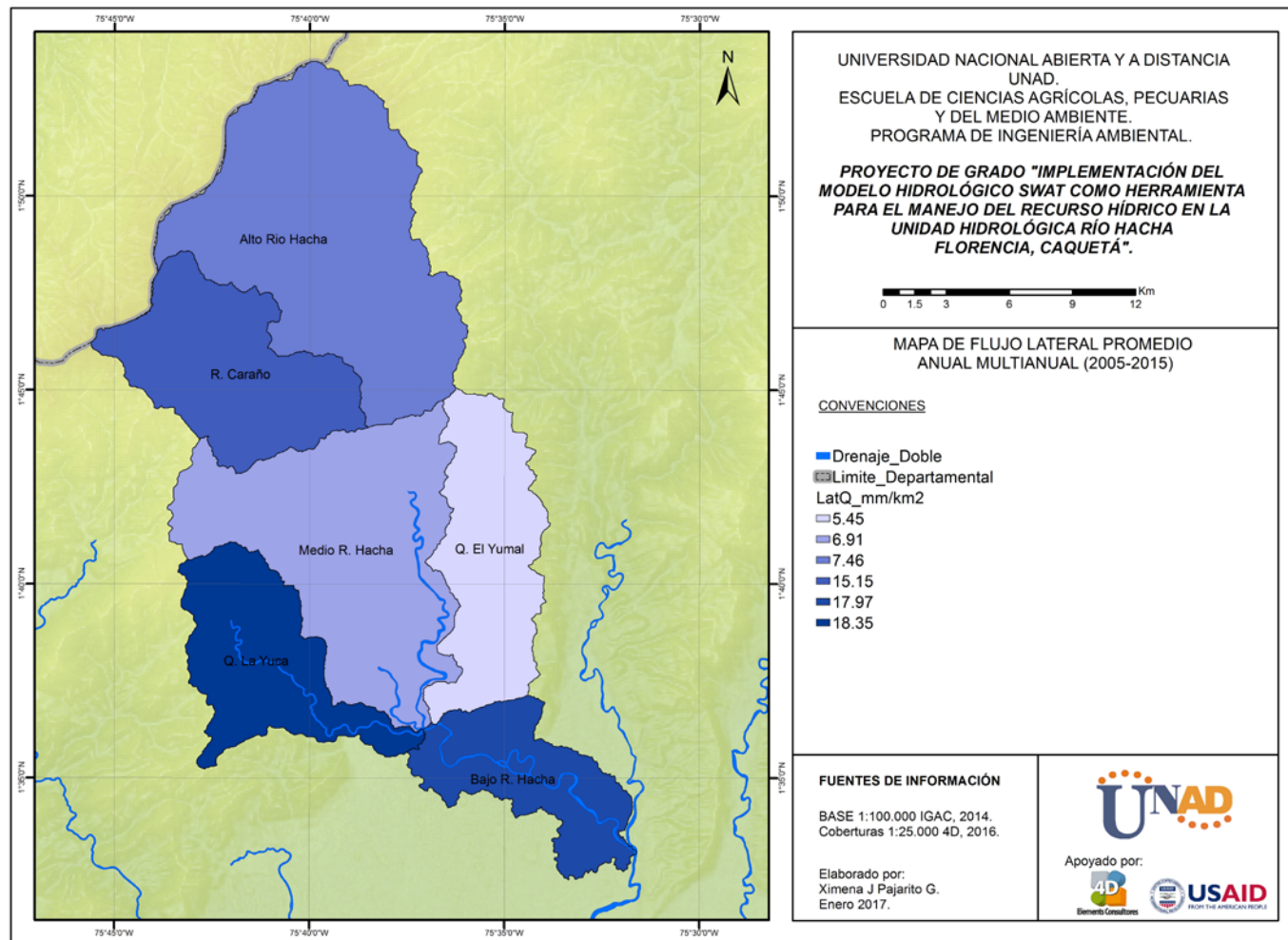
**Evapotranspiración (Promedio anual multianual):** La evapotranspiración considerada como el agua evaporada desde las superficies libres, la cual es incorporada en la atmosfera dada la transpiración de la cobertura vegetal, apoyando el cálculo de indicadores del balance hídrico, especialmente enfocados a la demanda de la cobertura natural, utilizada por las plantas para su crecimiento y producción. Evaluando este concepto, se encontró que la subunidad de análisis que presenta mayor evapotranspiración real es Bajo río Hacha ( $1.52 \text{ mm/km}^2$ ), seguido por la Quebrada La Yuca ( $1.17 \text{ mm/km}^2$ ), Quebrada El Yumal ( $0.88 \text{ mm/km}^2$ ), Rio Caraño ( $0.75 \text{ mm/km}^2$ ), Medio Río Hacha ( $0.47 \text{ mm/km}^2$ ) y Alto río Hacha ( $0.38 \text{ mm/km}^2$ ) y. Relacionándola con la precipitación se encontró que esta corresponde al 2.3% del total de la precipitación promedio anual multianual del área de estudio. **Mapa 11.**



**Mapa 11.** Evapotranspiración real promedio anual multianual.

Fuente: Autor.

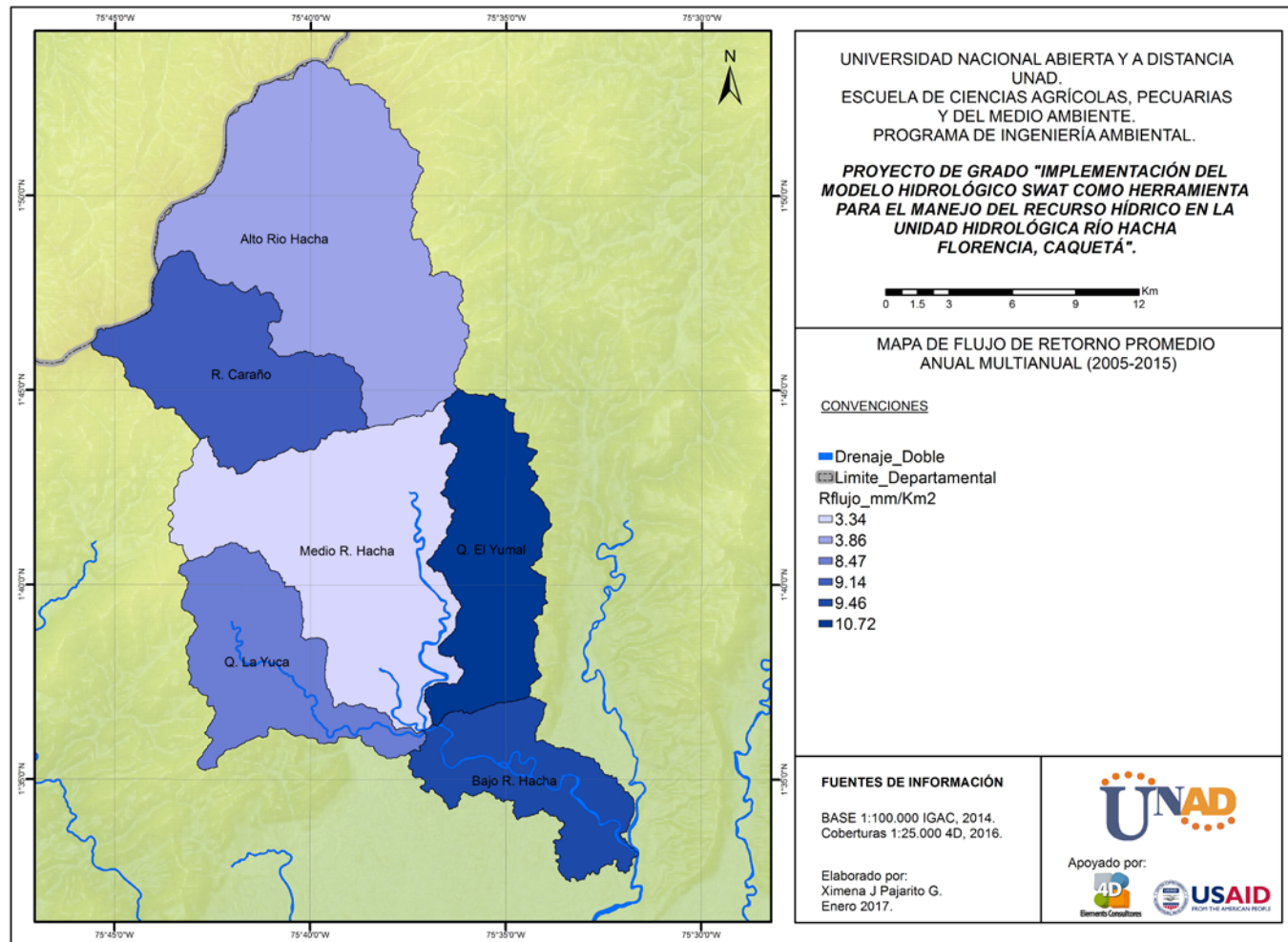
**Flujo lateral (Promedio anual multianual):** El flujo lateral es considerado como la escorrentía que traspasa la superficie de la tierra y es también llamado flujo subsuperficial, este aporta al caudal final del cauce principal de la unidad hidrológica. Analizando los resultados obtenidos se encontró que la subunidad de análisis Quebrada la Yuca es la que presenta mayor nivel de flujo lateral con (18.35 mm/km<sup>2</sup>) promedio anual multianual, seguido por el Bajo río Hacha (17.97 mm/km<sup>2</sup>), Río Caraño 15.15 mm/km<sup>2</sup>, Alto río Hacha 7.46 mm/km<sup>2</sup>, Medio río Hacha 6.91 mm/km<sup>2</sup> y en menor proporción la Alto Río Hacha con 5.45 mm/km<sup>2</sup>. Este flujo aporta significativamente al caudal total de la unidad hidrológica Hacha con un 44% el total. **Mapa 12.**



**Mapa 12.** Flujo lateral promedio anual multianual.

Fuente: Autor.

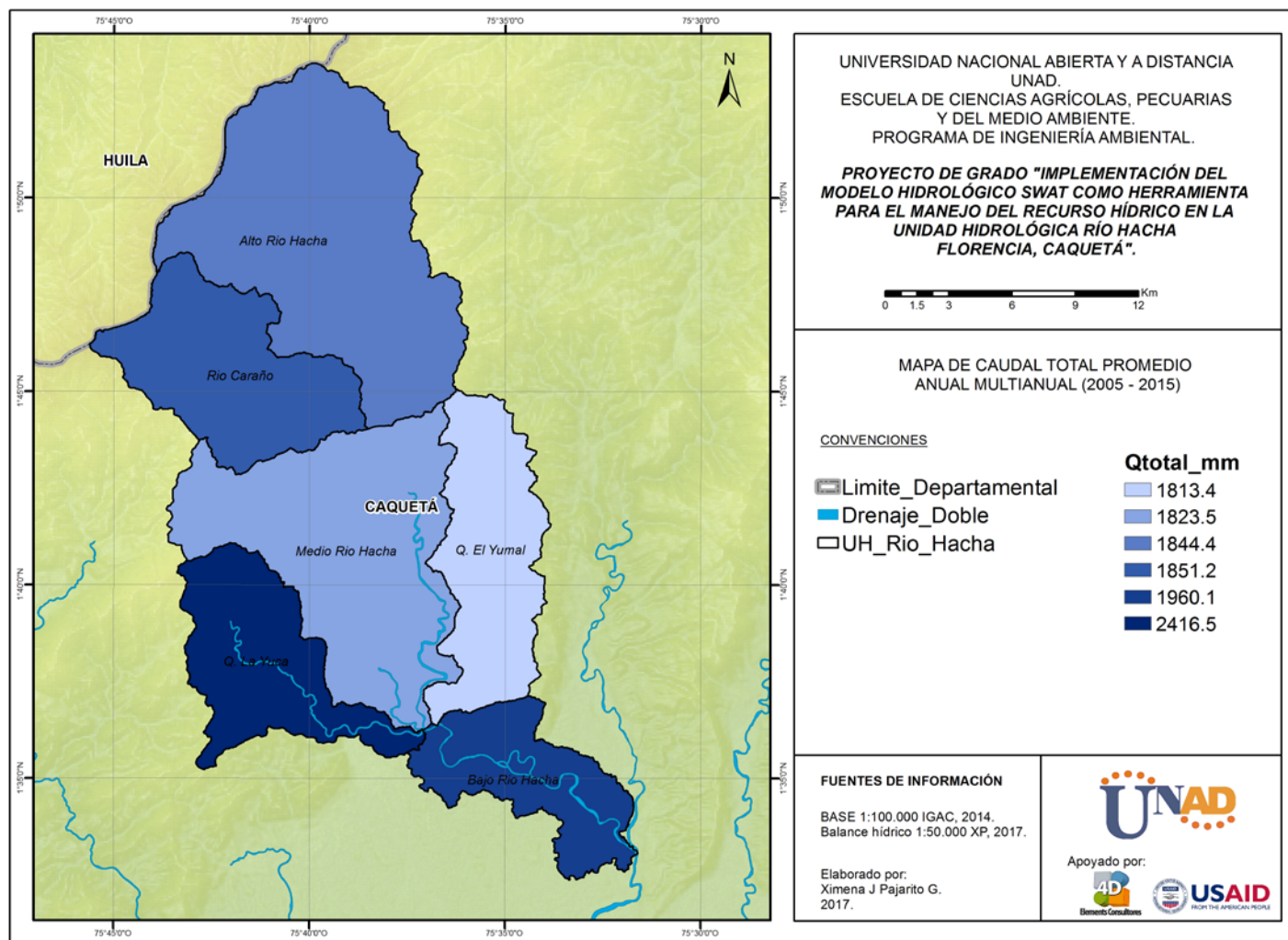
**Flujo de retorno (Promedio anual multianual):** Esta variable indica la cantidad de agua que es retornada a la unidad hidrológica de acuerdo a nivel de percolación, se considera también como la cantidad de agua que no logra traspasar la capa de confinamiento del suelo. Evaluando este variable le obtuvo que la subunidad de análisis que muestra un mayor flujo de retorno a la unidad hidrológica es la Quebrada el Yumal con 10.72 mm/km<sup>2</sup> promedio anual multianual, seguido por el Bajo río Caraño con 9.46 mm/km<sup>2</sup>, Río Caraño 9.14 mm/km<sup>2</sup>; y con un nivel inferior Alto río Hacha 8.47 mm/km<sup>2</sup>, Quebrada la yuca con 8.47 mm/km<sup>2</sup> y Medio río Hacha con 3.34 mm/km<sup>2</sup>. Esta variable como se muestra indica lo contrario a la variable de recarga de acuíferos. **Mapa 13.**



**Mapa 13.** Flujo de retorno a la cuenca promedio anual multianual.

Fuente: Autor.

**Caudal total (Promedio anual multianual):** Este es considerado la suma de la escorrentía superficial, flujo lateral y flujo de retorno, esto quiere decir que es la cantidad de agua que fluye por el cauce principal, para este caso en el río Hacha en la salida de la unidad. Observando el resultado, se encontró que la subunidad Quebrada la Yuca es la que presenta mayor caudal (2416.5 mm/s), seguido por Bajo río Hacha (1960.1 mm/s), Río Caraño (1851.2 mm/s), Alto Río Hacha (1844.4 mm/s), y finalmente Medio Río Hacha y Quebrada el Yumal con menor caudal, 1823.5 mm/s y 1813.4 mm/s respectivamente. Así mismo, relacionando los componentes del caudal total, se halló que la escorrentía corresponde al 29%, el flujo de retorno 27% y el flujo lateral 44% del total de caudal. **Mapa 14.**

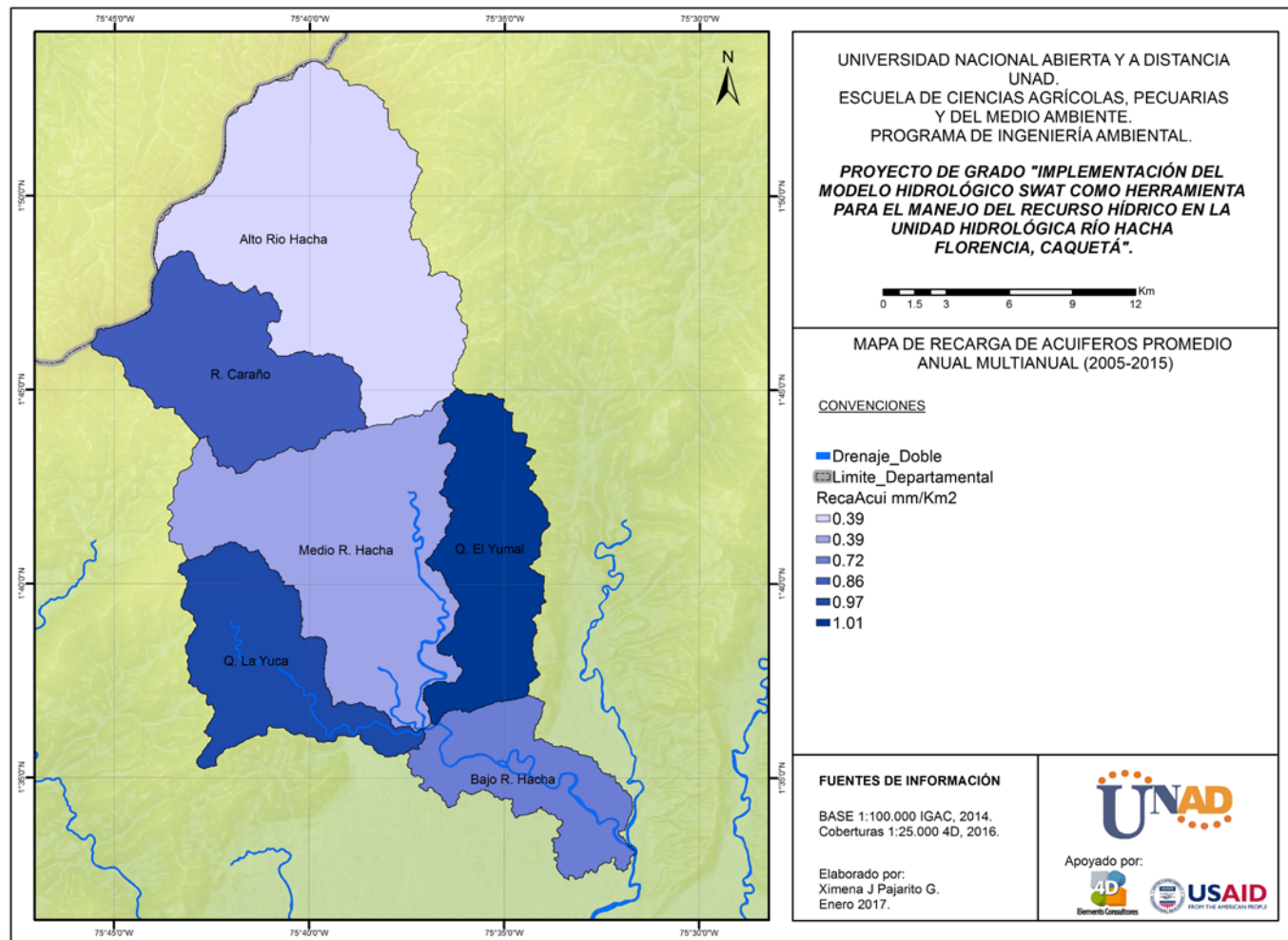


**Mapa 14.** Caudal Total promedio anual multianual.

Fuente: Autor.



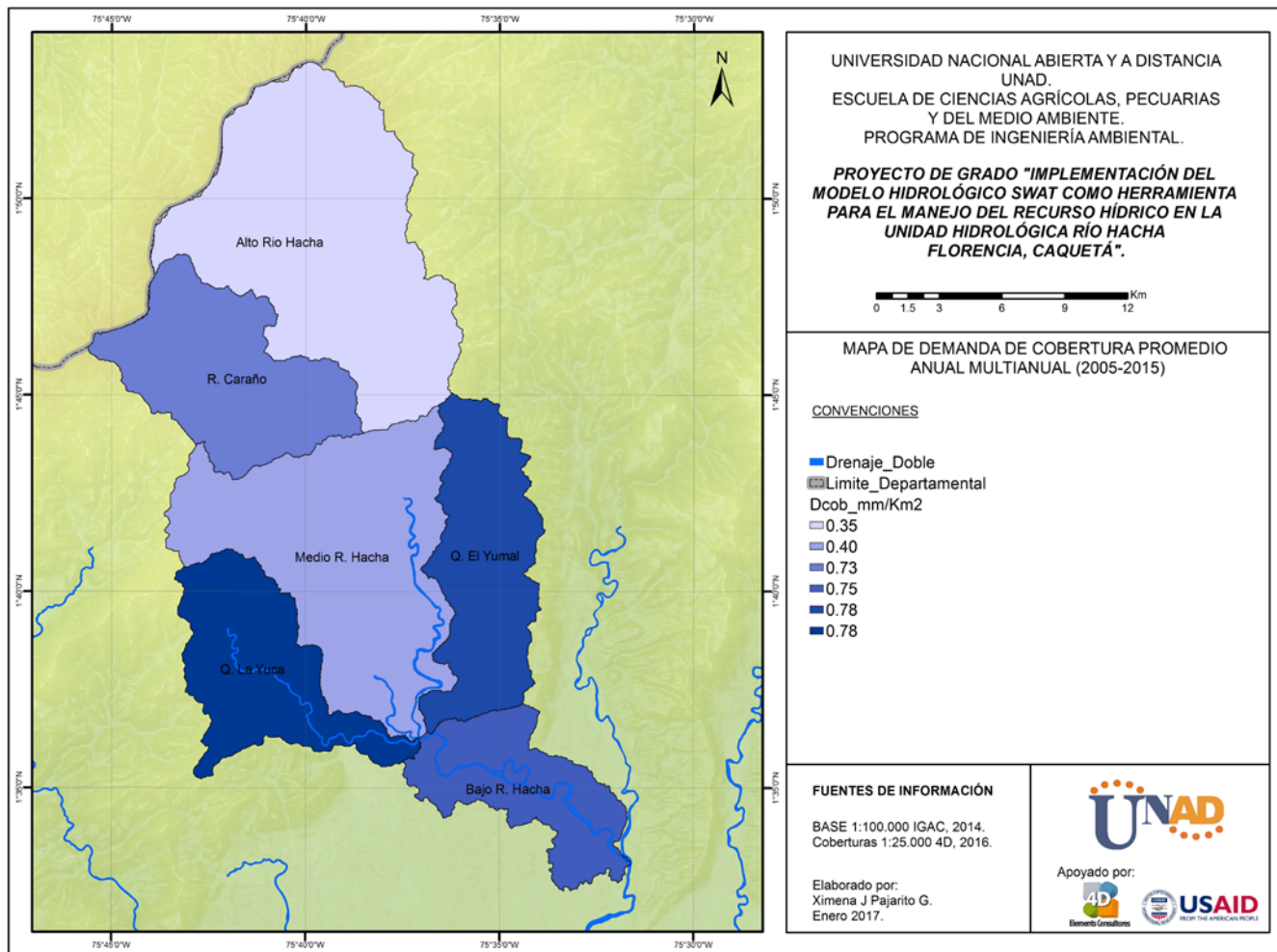
**Recarga de Acuíferos (Promedio anual multianual):** Es comprendida como la cantidad de recurso hídrico que continua o traspasa la capa de confinamiento y aporta al nivel de las aguas subterráneas, esta es calculada mediante la resta del flujo de retorno a la percolación; por lo tanto se encontró, que la subunidad de análisis que aporta en mayor nivel a la recarga de acuíferos es la Quebrada el Yumal ( $1.01 \text{ mm/km}^2$ ), y la unidad Alto río Hacha es la que aporta menor cantidad ( $0.39 \text{ mm/km}^2$ ). Relacionando esta recarga de acuíferos con los niveles de precipitación se puede afirmar que la unidad hidrológica río Hacha aporta 2% de la precipitación promedio anual multianual, para el periodo analizada a la recarga de acuíferos. **Mapa 15.**



**Mapa 15.** Recarga de acuíferos promedio anual multianual.

Fuente: Autor.

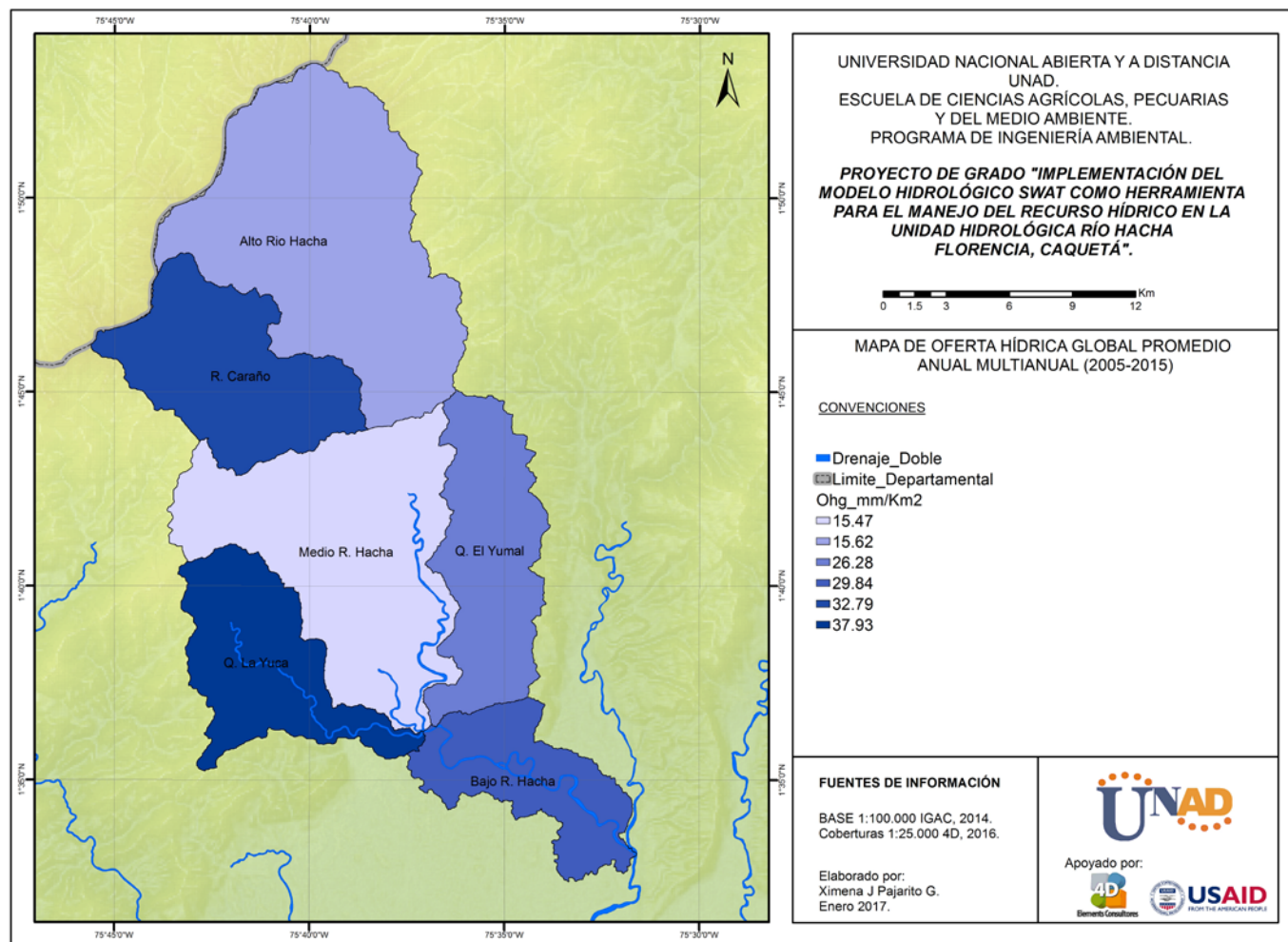
**Demanda de la cobertura (Promedio anual multianual):** Esta variable muestra la cantidad de recurso hídrico tomado por las coberturas, en la cual se relacionan la evapotranspiración potencial menos la evapotranspiración real, esto corresponde a la cantidad de recurso que requieren las coberturas, para su desarrollo y crecimiento. En este sentido, se encontró que la subunidad Quebrada la Yuca, es la que presenta mayor demanda de cobertura con un nivel de ( $0.78 \text{ mm/km}^2$ ) promedio anual multianual, seguido por la subunidad Quebrada el Yumal ( $0.78 \text{ mm/km}^2$ ), Bajo río Hacha ( $0.75 \text{ mm/km}^2$ ), y Río Caraño, Medio río Hacha y Alto río Hacha, con niveles inferiores ( $0.73 \text{ mm/km}^2$ ,  $0.40 \text{ mm/km}^2$  y  $0.35 \text{ mm/km}^2$ ) respectivamente. **Mapa 16.**



**Mapa 16.** Demanda hídrica por cobertura promedio anual multianual.

Fuente: Autor.

**Oferta hídrica global (Promedio anual multianual):** La oferta hídrica global, evaluada desde el concepto de la resta de precipitación menos evapotranspiración y escorrentía, la cual muestra el volumen de agua disponible para cada una de las subunidades de análisis; se encontró que, la Quebrada la Yuca seguido por el Río Caraño, son los que presentan mayor oferta hídrica en la unidad con 37.93 y 32.79 mm/km<sup>2</sup>, respectivamente. Por otro lado, la subunidad que presentan menor oferta es Medio río Hacha con 15.47 mm/km<sup>2</sup>. Relacionando la oferta hídrica global con el nivel de precipitación se puede afirmar que el 77% de la precipitación corresponde a la oferta hídrica global, partiendo de esto se debe tener en cuenta la relación que esta tiene igualmente con los demás parámetros del ciclo hidrológico, que para este caso es relevante el nivel de percolación y recarga de acuíferos con la cual se cuenta en la zona. **Mapa 17.**



**Mapa 17.** Oferta hídrica global promedio anual multianual.

Fuente: Autor.

### 7.3.2 Calibración

La calibración del modelo, se realiza para el periodo de análisis de 2005 – 2009 (Teniendo en cuenta que este periodo de tiempo comprende tanto años secos como años húmedos), para este proceso se ejecuta la comparación de los datos simulados versus los datos observados de la estación limnográfica (44037050), ubicada en la salida de la unidad hidrológica río Hacha.

Antes de aplicar la ecuación del coeficiente de eficiencia, se hace necesario definir la función objetivo, esta corresponde a la medida de bondad de ajuste (error de balance de masas, coeficiente de correlación, eficiencia de Nash Sutcliffe, entre otros), pero también puede ser una combinación de estas dependiendo directamente del objetivo del investigador, lo cual recibiría el nombre de función multi-objetivo.

Para este trabajo de investigación se decide desarrollar la calibración de forma “Prueba error”, de acuerdo a lo establecido por el ingeniero Cabrera en su documento de *Calibración de modelos hidrológicos*, mediante el uso del indicador de medidas de bondad de ajuste denominado “coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE)”, el cual es usado comúnmente para la calibración de modelos hidrológicos y en la literatura se han observado resultados satisfactorios; este coeficiente mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación durante el periodo de calibración, que para este caso como ya se indico va desde 2005 a 2009. **Ecuación 6.** Si la simulación es perfecta,  $E = 1$ ; si se intenta ajustar o calibrar el modelo con las observaciones valor promedio, entonces el indicador tendera a  $E = 0$ .

**Ecuación 6.** Coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe. (1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2}$$

Fuente: Nash y Sutcliffe. 1970.

En la cual:

$Q_0^t$  = caudal observado por el periodo de tiempo de calibración

$Q_m^t$  = Caudal simulado por el periodo de tiempo de calibración

$\overline{Q_0}$  = promedio del caudal observado por el periodo de tiempo de calibración

Esta calibración se realiza con la **Ecuación 6**, bajo los datos mensuales reportados en la **Tabla 13**, siendo estos el promedio mensual multianual del caudal final de unidad hidrológica en  $\text{cm}_3/\text{s}$ ; aplicada la ecuación se obtuvo que el coeficiente de eficiencia Nash y Sutcliffe (E), arrojo un valor de 0.842, indicando que el proceso de simulación es excelente, y que presenta un 84% de efectividad con relación a los datos observados. Esta clasificación se realiza bajo los datos reportados en la tabla de clasificación. **Tabla 14**.

**Tabla 13.** Datos de caudal mensuales observados y simulados, para la unidad hidrológica río Hacha.

Año	Datos observados	Datos simulados
2005	0.41	0.39
2006	0.19	0.42
2007	0.27	0.35
2008	0.28	0.43
2009	0.26	0.44

Fuente: Autor.



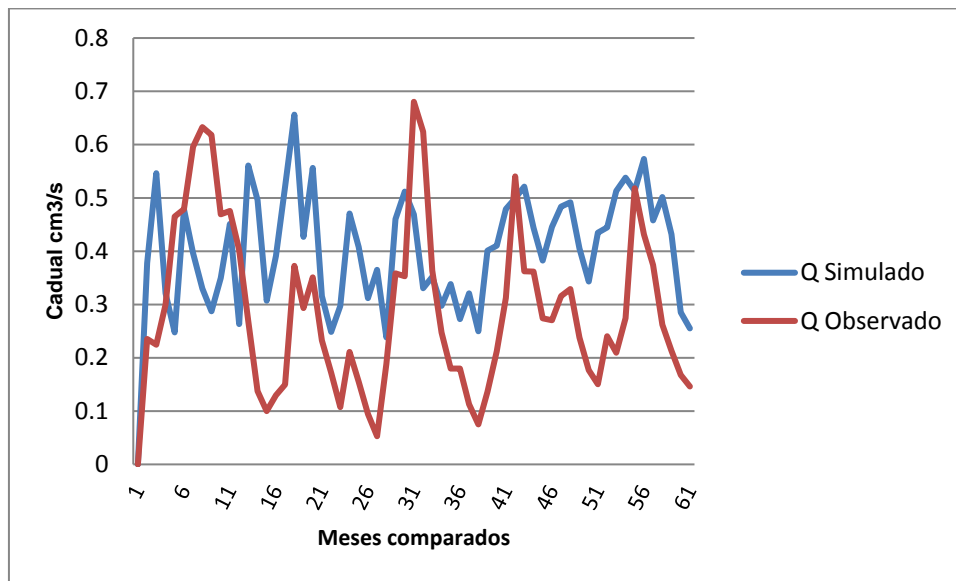
**Tabla 14.** Clasificación de resultados coeficiente de eficiencia Nash y Sutcliffe.

Coeficiente	Clasificación	Valor
NSE	Excelente	> 0.8
	Muy Bueno	0.6 - 0.8
	Bueno	0.4 - 0.6
	Satisfactorio	0.2 - 0.4
	Insuficiente	< 0.2

Fuente: Molnar, 2011.

Revisando los datos simulados y los datos observados en la unidad hidrológica río Hacha, se halló que existen variaciones en algunos meses, siendo estos picos sobresalientes de la serie historia, lo que conlleva a una sobreestimación de los caudales finales de la unidad hidrológica. Dado los datos resultantes se podría afirmar que esto se debe principalmente a la carencia de estaciones climáticas en el área de estudio principalmente en la parte alta.

**Figura 8.** Aunque los resultados obtenidos muestran un buen nivel de correlación con los datos medidos, se recomienda para futuros proyectos revisar la tabla de clasificación del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe, debido a que el rango de clasificación se considera amplio y se observan sobreestimación de los caudales en varios meses de la simulación.



**Figura 8.** Caudal mensual observado y simulado, para el periodo de 2005 - 2009.

Fuente: Autor.

### 7.3.3 Subcuencas con potencialidad hídrica

Relacionando todas las variables anteriormente descritas, se logró identificar que la subunidades de análisis río Caraño, Quebrada la Yuca y Quebrada el Yumal, son las que aportan en mayor cantidad de recurso hídrico a la unidad hidrológica Hacha, evaluadas desde el nivel de caudal total, la recarga de acuíferos, niveles de precipitación, y oferta hídrica global; considerándolas como puntos de potencialidad hídrica importantes para la zona de estudio; sin embargo, cabe resaltar que evaluando los resultados obtenidos por el modelo, se encontró que los datos no presentan mayor variabilidad entre las subunidades de la parte alta de la unidad río Hacha, lo que muestra un alto porcentaje de aporte de las subunidades río Caraño y Alto río Hacha a la oferta hídrica global del área. Igualmente se debe rescatar que estas dos subunidades son las que presentan mayor porcentaje de cobertura boscosa en la zona.

En el caso de la Quebrada el Yumal, se halló que esta es la subunidad que presenta mayor área en territorios urbanos, ubicándose en ella un alto porcentaje de la ciudad de Florencia, lo que conlleva a la disminución paulatina de la oferta hídrica global con relación a las demás subunidades de la parte media. Sin embargo, el contar con un alto nivel de cobertura boscosa, hace que esta subunidad aporte caudales representativos para el área de estudio.

Con respecto a la similitud de los valores encontrados en la parte alta y media de la unidad hidrológica río Hacha, se considera importante atribuir esta relación a la falta de información de estaciones climáticas tanto en la zona alta como en la zona media de la unidad, cabe resaltar que los datos simulados para el caso de precipitación se encuentran dentro del rango de los datos reportados por IDEAM, para la zona, lo que se considera relevante para expresar que la simulación generada por el modelo, arroja resultados similares a la realidad. No obstante, se debe tener en cuenta que si fuera posible obtener información de más estaciones climáticas, y a su vez información más detallada de la zona, los resultados serían aún más cercanos a la realidad en el territorio.

Por otro lado, analizando el clima de la zona y las condiciones variables, con respecto al régimen monomodal, propone evaluar la posibilidad de generar procesos de aprovechamiento temporal de los recursos naturales en este caso del recurso hídrico, paralelo a este régimen de las lluvias, esto con el propósito de no generar estrés hídrico sobre la cobertura natural o desabastecimiento en alguna temporada del año.



## **8. Conclusiones y Recomendaciones**

### **8.1 Conclusiones**

La implementación del modelo de simulación hidrológica, permitió relacionar los datos obtenidos con los datos consignados en el último comunicado de Cambio Climático del IDEAM, en el cual se reporta que la zona del río Hacha presenta un promedio anual de precipitación entre los 2.000 – 4.000 mm, y que a su vez esta zona presenta un régimen de lluvias monomodal, con mayores niveles de lluvia en los meses de abril a noviembre.

La oferta hídrica global calculada bajo los datos simulados, como su nombre lo indica muestra la oferta global en la cual no se ha contemplado la demanda por captaciones legales o ilegales existentes a la fecha, debido principalmente a que esta información no fue posible obtenerla para la implementación del presente modelo, por lo tanto se resalta que estos datos consideran la cuenca como unidad que a la fecha no presenta sustracción de recurso hídrico.

Con los datos obtenidos en la calibración se llega a la conclusión que el modelo de simulación SWAT, se puede pensar como una buena aproximación a la realidad del área de estudio y podría ser considerado como una línea base de la cuantificación de los recursos hídricos en el área, a su vez se considera que los datos resultados de la simulación apoyan la toma de decisiones en el territorio en cuanto al manejo del recurso hídrico. Destacando que la instalación de nuevas estaciones climáticas en la zona de estudio aportara principalmente a la disminución de la incertidumbre de los datos obtenidos en futuras simulaciones.

Las subcuencas con mayor potencialidad hídrica encontradas permiten resaltar la importancia de las dos quebradas que confluyen en la parte media del río Hacha, eso quiere decir que aunque la principal fuente de consumo para el municipio de Florencia, se ubica sobre el río Hacha, se debe contemplar que la unidad hidrológica se encuentra conformada como un sistema en el cual todos los componentes aportan de manera potencial al producto final de la zona, por lo tanto los procesos en pro del mejoramiento de las condiciones de cobertura se deben también enfocar en esta zona y no únicamente en la parte alta de la unidad hidrológica.

Con respecto a las HRU, que conforma el modelo SWAT, se logró identificar 42 HRU, las cuales se distribuyen sobre la parte alta de la unidad hidrológica río Hacha principalmente, lo cual muestra una uniformidad de las condiciones tanto de cobertura como de características de los suelos, en la parte alta de la unidad, como también en la parte central de la unidad, mostrando una diferencia marcada en la parte baja y en el centro de la unión de las dos subunidades de la parte alta.

La herramienta de modelación hidrológica, bajo el concepto del balance hídrico, permite evaluar los aspectos principales de una unidad hidrológica de forma detallada, lo cual genera una aproximación de la afectación que genera la expansión de la frontera agropecuaria y urbana en las zonas con alto nivel de conservación, dado lo anterior, se puede afirmar que si la frontera agropecuaria aumenta en la zona del río Hacha, la oferta del recurso hídrico se va a ver afectada en alto nivel, debido a que la zona boscosa es la que actualmente está proporcionando los niveles más altos de oferta y disponibilidad hídrica.

Relacionando lo anterior, se considera relevante los resultados obtenidos mediante la simulación hidrológica, los cuales permitirán a las autoridades ambientales competentes tomar decisiones en el territorio, sin embargo es importante considerar que la interpretación de los mismos debe realizarse correctamente, esto con el fin de analizar información clara y concisa del proceso que se está desarrollando.

Con respecto a los niveles de recarga de acuíferos, se podría considerar relevante generar un análisis más detallado, ya que el panorama que muestra los resultados de la simulación se orientan hacia la posible disminución del recurso hídrico en la parte central de cuenca,

partiendo de que este indicador muestra un bajo nivel de recarga, con respecto a los niveles de lluvia de la zona de estudio, esto también se asocia principalmente al tipo de suelo, lo que generaría un cambio si se desarrollan estudios detallados de los suelos y sus características fisicoquímicas.

Como propuesta de manejo, se considera pertinente evaluar inicialmente la función de las zonas de protección ambiental existentes en la unidad hidrológica, esto con el fin de mejorar las condiciones de la cobertura natural que se encuentra en estas áreas, igualmente se considera importante iniciar procesos de declaración de áreas de protección ambiental a nivel local, principalmente en la zona de acueductos veredales o acueductos multifamiliares, que presenten posibles problemas de abastecimiento, los cuales se pueden identificar con los indicadores calculados en el presente documento.

## **8.2 Recomendaciones**

Se recomienda la instalación de nuevas estaciones meteorológicas completas en la parte alta y media de la unidad hidrológica río Hacha, como también un plan de mantenimiento continuo de las estaciones existentes con el propósito de generar series históricas consistentes. Igualmente, se recomienda evaluar la posibilidad de incluir medición de variables de temperatura en las estaciones existentes, si fuera posible de forma automatizada.

Se recomienda generar estudios detallados de suelos, para la zona o si fuera posible para el departamento, teniendo en cuenta que esta zona del país es una de las zonas que presenta mayor índice de deforestación y por ende los suelos presentan altos cambios con el pasar el tiempo, así mismo dada la lejanía de los puntos de muestreo existentes, los que no permiten obtener información para algunas zonas del departamento.

Se recomienda evaluar la finalidad y propósitos de las zonas de protección ambiental existentes en la unidad hidrológica Hacha, teniendo en cuenta que más del 80% del

territorio se encuentra al interior de una de estas categorías, sin embargo a su vez presenta altos niveles de cambio en la cobertura natural, especialmente en la cobertura boscosa.

Se recomienda plantear alternativas de agricultura sostenible en la zona del río Hacha esto con el fin de disminuir la afectación a la cobertura natural, así mismo se recomienda la implementación de programas de construcción de corredores biológicos, que permitan mejorar las condiciones actuales del territorio, enfocado principalmente al aumento de la cobertura natural, enlazado a prácticas campesinas sostenibles, que disminuyan la afectación a los recursos naturales.

Generada la información detallada de la zona, se recomienda al departamento contemplar la posibilidad de implementar nuevamente el modelo de simulación hidrológica con el fin de afinar los resultados arrojados en el presente trabajo de investigación.

Se recomienda bajo los datos obtenidos mediante esta primera simulación, iniciar el un proyecto de investigación del estado actual del recurso hídrico en el área de estudio, mediante la implementación de un proyecto enfocado a la aproximación y cuantificación de los servicios eco sistémicos en la zona, partiendo de los datos arrojados mediante esta simulación, siendo estos una aproximación inicial del estado actual del área de estudio y siendo esta la línea base de la cuantificación de los recursos hídricos en el área.



## Glosario

**Ciclo hidrológico:** se denomina al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea”; es decir, que es el proceso global por el cual se considera al agua un recurso natural renovable; debido a que en esa circulación espontánea y continua el líquido vital se purifica y retorna temporalmente a sus fuentes, que la ponen al alcance de sus múltiples demandantes. (Sánchez San Román, 2001).

**Unidad hidrológica:** subsistema hídrico con características de relieve y drenaje homogéneo, integrado por microcuencas de las partes altas, medias o bajas de una subzona hidrográfica y que captan agua y sedimentos de los tributarios de diferente orden tales como nacimientos de agua, arroyos, quebradas y ríos. (MAVDT, GIRH, 2010).

**Balance Hídrico:** consiste, básicamente, en la aplicación del principio de conservación de masa, también conocido como ecuación de continuidad. La ecuación de continuidad establece que, para cualquier volumen de agua arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas del sistema estará condicionada por la variación del volumen almacenado. Así, para cualquier zona, cuenca natural o masa de agua superficial, indica los valores relativos de entrada y salida del flujo y la variación del volumen de agua almacenado en un período de tiempo dado. (Arnold et al., 1991)

**Sistemas de información geográfica:** Conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos a la Tierra (Departamento de Medio Ambiente (DoE), Burrough, Goodchild, Rhin y otros, 1978)

**Modelo Hidrológico:** Un modelo hidrológico es una representación simplificada de fenómenos que ocurren durante el ciclo hidrológico, tales como precipitación, evaporación, escorrentía y otros (Chow et al., 1994); sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas del sistema

**Gestión integrada del recurso hídrico o manejo del recurso hídrico:** significa que todos los usos diferentes del recurso hídrico deben ser considerados en conjunto. La distribución del agua y las decisiones de gestión consideran los efectos de cada uno de los usos sobre los otros. Son capaces de tomar en cuenta de forma global, las metas sociales y económicas, incluyendo la búsqueda del desarrollo sostenible. Como veremos, el concepto básico de GIRH ha sido ampliado para incorporar la toma de decisiones participativa. Diferentes grupos de usuarios (agricultores, comunidades, ambientalistas) pueden tener influencia en las estrategias para el desarrollo y la gestión del recurso hídrico. Esto genera beneficios adicionales, como usuarios informados que aplican auto-regulación local con relación a cuestiones tales como conservación del agua y protección de sitios de captación de una manera mucho más efectiva que la que puede lograrse con regulación y vigilancia centralizadas. (Cap-Net. 2005)

## 9. Bibliografía

- CAP - Net, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, Asociación Mundial para el Agua GWP. (2005). Planes de Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Manual de Capacitación y Guía Operacional. USA.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical, CGIAR Challenge Program On Water & Food y Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Texas, USA.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT., Uribe N., y Valencia J. (2010). Impacto del uso de la Tierra en la Generación de Caudales y Sedimentos: Caso Cuenca del río Tunjuelo - Cundinamarca. Colombia.
- Corpoamazonia, Universidad de la Amazonia Convenio 051 de 2004. (2005). Plan de ordenamiento y manejo del Rio Hacha Florencia – Caquetá 2006 – 2025. Florencia, Colombia.
- Fundación Amigos de la Naturaleza. (2015). Disponibilidad Hídrica y Demanda de Agua en la Cuenca Piraí: Situación Actual y Escenario de Cambio Climático. Modelación Hidrológica en SWAT y WEAP. Bolivia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2000). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Caquetá. Colombia.
- López F., y Girón E. (2007). Pago por Servicios Ambientales para Generar una Nueva Dinámica de Desarrollo Rural en los Andes. Análisis Biofísico (Modelo SWAT. Cuenca del río Jequetepeque. Cajamarca - Perú.
- Ministerio de Ambiental, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Colombia.
- Molnar P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

- Monteiro E., Salviano F., Dos Santos F., y Lucio P. (2009). Modelagem Hidrologica Deterministica e Estocastica Aplicada a Regiao Hidrografica do Xinngu - Pará. Brasil.
- Oñate, F, y Aguilar, G. (2003). Aplicación del modelo SWAT pata la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del rio Catamayo. Loja, Ecuador.
- Ortiz, A. (2010). Implementación del modelo hidrológico Swat: Modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la cuenca del lago Cuitzeo. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de México. Morelia, Michoacán.
- Ponce V. (1989). Engineering Hydrology. Principles and Practices. Modelos Hidrológicos. San diego - California. USA.
- Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela., y Cisneros, C. (2006). Aplicación del Modelo SWAT en la Subcuenca del Río Ambato. Corporación Randi Randi. Ecuador.
- Ramirez F., Hincapie E., y Sadeghian S. (2009). Erodabilidad de los Suelos de la Zona Central Cafetera del Departamento de Caldad. Colombia.
- Silva O. (2004). El Modelo SWAT en una Cuenca Pequeña de Altas Pendientes: Simulacion de la Produccion de Agua.
- Torres E., Fernández D., Oropeza J., y Mejía E. (2004)- Calibración del modelo Hidrológico SWAT en la Cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. México.
- Torres E., Mejía E., Cortés, J., Palacios, E., y Exebio, A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del rio Laja, Guanajuato, México. Agrociencia, 39 (5), 481 – 490.
- Torres E., Mejía E., Cortés J., Palacios E y Exebio A. (2005). Adaptación de un Modelo de Simulación Hidrológica a la Cuenca del río Laja, Guanajuato. México. México.
- Universidad Católica de Colombia., Hernández D. (2015). Estimación de los Parámetros Morfométricos y las Unidades de Respuesta Hidrológica de la Cuenca del río Raquira departamento de Boyacá a través del Programa SWAT. Colombia.
- Universidad Autónoma Chapingo. Martínez L., Rodríguez I., e Ibáñez L. (2015). Calibración del modelo SWAT, en la cuenca del río Turbio, Guanajuato. México.
- Universidad de Chile. Mancilla G. (2008). Apuntes Docentes, Uso y Conservación de Suelos "Uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE en el Campo Forestal". Chile.

Universidad de Medellín. Ocampo O., y Vélez J. (2013). Análisis Comparativo de Modelos Hidrológicos de Simulación Continua en Cuencas de Alta Montaña: Caso del río Chinchiná. Colombia.

Universidad Nacional de Colombia. Correa O. (2003). Modelo Dinámico para Calificación de a Amenaza Pluvial y Evaluación de la Posibilidad de Erosión en la Sectorización Geotécnica de Oleoductos y su Aplicación en la Planeación y Toma de Decisiones. Colombia.

Universidad Nacional de Ingeniería. Cabrera J. (2017). Modelos Hidrológicos. Perú.

Universidad Nacional de Ingeniería. Cabrera J. (2017). Calibración de Modelos Hidrológicos. Perú.

Universidad Nacional Agraria La Molina. Escuela de Postgrado. Chávarri E. (2008). El ciclo Hidrológico e Introducción a Modelos Hidrológicos. Perú.

Universidad Politécnica de Cartagena. Olmos P. (2015). Evaluación de la variabilidad hidroclimática desde modelos climáticos regionales a escala de cuenca. España.